

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΝΕΦΩΣΕΩΣ ΨΥΧΟΜΕΝΟΥ
ΜΕ ΥΓΡΟ ΑΖΩΤΟ**

**CONSTRUCTION OF A LIQUID NITROGEN COOLED
CLOUD CHAMBER**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ
ΤΣΙΓΚΟΥ ΜΑΡΙΑΣ του ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ

Σπουδάστριας της
Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επίκουρος Καθηγητής Ν.Π. Πετρόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2020

Αποποίηση τυχόν ευθυνών

Αυτό το κείμενο συντάχθηκε ως προϊόν φοιτητικής διπλωματικής εργασίας και δεν είναι το αποτέλεσμα επαγγελματικής μελέτης διπλωματούχου μηχανικού. Στο κείμενο αυτό περιέχονται επιστημονικές πληροφορίες και αποτελέσματα σε σχέση με το αντικείμενο που περιγράφεται στον τίτλο. Για το περιεχόμενο αυτό έχει δοθεί κατά το δυνατό η αναγκαία προσοχή ώστε να διασφαλισθεί η ποιότητά του κατά τη στιγμή της δημοσίευσης. Διευκρινίζεται ότι η δημοσίευση του κειμένου αυτού γίνεται χωρίς να υπάρχει άμεση ή έμμεση σύνδεση της συγγραφέως ή του επιβλέποντός της με σχετικά εμπορικά ή οικονομικά συμφέροντα. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της, ούτε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο διατυπώνουν κάποια γραπτή εγγύηση, ρητή ή έμμεση, συμπεριλαμβανομένων των εγγυήσεων που αφορούν στην ασφάλεια και την προστασία ατόμων και υλικού και στην καταλληλότητα για χρήση των περιεχόμενων επιστημονικών πληροφοριών και αποτελεσμάτων για τους σκοπούς οπτικής αναγνώρισης και ανίχνευσης ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της, ούτε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο αποδέχονται κάποια νομική ή άλλη ευθύνη για την ποιότητα, την ακρίβεια, την πληρότητα, τη χρησιμότητα, τυχόν λάθη, τυχόν παραλείψεις στο περιεχόμενο του κειμένου ή για τις συνέπειες οποιασδήποτε απόφασης που θα ληφθεί με βάση το περιεχόμενο αυτό. Επίσης δεν αποδέχονται ειδικότερα και νομική ευθύνη για την απώλεια προσδοκώμενων κερδών ή για τη δημιουργία συνακόλουθων ζημιών από τη χρήση του περιεχόμενου αυτού. Παρόλα αυτά, καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια ώστε η παραγωγή των περιεχόμενων αποτελεσμάτων να προκύψει ως αποτέλεσμα καλών πρακτικών επιστημονικής ανάλυσης. Η συγγραφέας και ο επιβλέπων της είναι διαθέσιμοι για την παροχή συμβουλών σε ό,τι αφορά επιβεβαίωση των περιεχόμενων αποτελεσμάτων καθώς και για οδηγίες σχετικά με την ενδεδειγμένη χρήση τους.

Πνευματικά δικαιώματα και σχετικές ευθύνες

Οι αναγνώστες μπορούν να χρησιμοποιούν το μέρος του περιεχομένου που τους ενδιαφέρει για δική τους προσωπική και αποκλειστική χρήση αλλά όχι για δημοσίευση ή παρουσίασή τους ως δικά τους ή χωρίς κατάλληλη αναφορά στην πηγή. Τυχόν παράλειψη της αναφοράς στην πηγή συνιστά το αδίκημα της λογοκλοπής. Οι αναγνώστες έχουν τη ρητή υποχρέωση να μην παραβιάζουν ή να μην ενθαρρύνουν / επιτρέπουν την παραβίαση των νομίμων πνευματικών δικαιωμάτων των σχετικών με το κείμενο αυτό χρησιμοποιώντας τα περιεχόμενα αποτελέσματα με ανάρμοστο τρόπο. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της θα αποδεχθούν ποτέ όποια ευθύνη τυχόν προκύψει ως συνέπεια παραβιάσεων πνευματικών δικαιωμάτων. Τα φυσικά ή τα νομικά πρόσωπα, τα υπεύθυνα για τις παραβιάσεις αυτές θα είναι, ως εκ τούτου, τα μόνα υπόλογα για τυχόν ζημιές ή άλλες συνέπειες. Το κείμενο αυτό προστατεύεται σε ό,τι αφορά τα πνευματικά δικαιώματα από άδεια [Creative Commons License](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/) by Attribution / No Derivatives, βάσει της οποίας οι χρήστες επιτρέπεται κυρίως να αντιγράψουν, διανέμουν και να χρησιμοποιούν το περιεχόμενο τους (αλλά να μην δημιουργούν παράγωγα από αυτό), υπό την προϋπόθεση ότι κάνουν την πρέπουσα αναφορά στην πηγή. Όσοι από εσάς γνωρίζετε την συμβολική γλώσσα της αντίστοιχης άδειας Creative Commons, η σχετική εικόνα σήμανσης έχει ως εξής:



Η συνιστώμενη αναφορά στην πηγή είναι:

Tsigkou, M.A., Construction of a Liquid Nitrogen Cooled Cloud Chamber, Diploma Dissertation (in Greek), Nuclear Engineering Laboratory, National Technical University of Athens, Athens, 2020, available on-line (αναφέρατε διαδικτυακό σύνδεσμο και ημερομηνία ανάγνωσης). Σε περίπτωση που εντοπίσατε αυτό το κείμενο μέσω άλλης δημοσίευσης των συγγραφέων, παρακαλείσθε να αναφέρετε ως πηγή και αυτή τη δημοσίευση.

Υπεύθυνη δήλωση σχετικά με τη λογοκλοπή

Τόσο η συγγραφέας όσο και ο επιβλέπων της έχουν λάβει υπόψη τους το κανονιστικό και ηθικό πλαίσιο που ισχύει διεθνώς σχετικά με την λογοκλοπή και δηλώνουν ότι, με βάση τα όσα γνωρίζουν, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν αυτόνομης εργασίας της συγγραφέως και ότι για τυχόν κείμενα άλλων αντούσια ή σε παράφραση ή άλλες εξωτερικές πληροφορίες και δεδομένα που χρησιμοποιούνται υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποιήθηκαν.

Disclaimer

This document has been edited as a result of a Diploma Dissertation project accomplished by a student and it is not the result of a professional study by a certified engineer. This document is designed to provide scientific information and results with regard to the matter covered by its title; all reasonable care has been taken to ensure quality of the results at the time of publication. This document is published on the understanding that neither the author nor her supervisor are directly or indirectly connected to any relevant commercial or financial interests. Neither the author nor her supervisor or the National Technical University of Athens (NTUA) make any warranty, expressed or implied, including the warranties of personnel and installations safety and security and fitness for use of the herein included data for the purpose of visual recognition and detection of ionizing radiation or accept any legal liability or responsibility for the quality, accuracy, completeness, usefulness, any errors, any omissions within the content of this document, or for the consequences of any decisions taken on the basis of the information provided. This includes, but is not limited to, loss of anticipatory profits or consequential damages from the use of this information. Nonetheless, considerable effort has been put so that best scientific analysis practices were followed during the production of the presented results. The author and her supervisor are available for consultation regarding the verification and implementation of the presented data.

Copyright note and relevant liabilities

Readers may copy the part of the content, in which they are interested, for their own use and not for publication, display and/or plagiarism. Readers are expressly required not to infringe or authorize any infringement of any legal rights related to these data by inappropriately using the information provided. Neither the author nor her supervisor will accept any liability in respect of such infringement, and the individuals or entities responsible will be personally liable for any damages or other liability arising. This document is protected by the [Creative Commons License](#) by Attribution / No Derivatives, which primarily means that licensees may copy, distribute, display and repeat the work (but not make derivatives based on it) only if they give the author the credits. For those of you familiar with the Creative Commons Symbolic Signs, then the respective marking is as it follows:



Recommended citation is as it follows:

Tsigkou, M.A., Construction of a Liquid Nitrogen Cooled Cloud Chamber, Diploma Dissertation (in Greek), Nuclear Engineering Laboratory, National Technical University of Athens, Athens, 2020, available on-line (please mention URL and access date). *In case that you have reached this document through another publication of the authors, please, cite this publication as well.*

Plagiarism statement

Both the author and her supervisor are aware of the legal and ethics framework internationally applicable regarding plagiarism. Therefore, they both declare that the content of the present Diploma Dissertation is a product of the author's autonomous work. References to sources are duly and appropriately provided for texts of others either quoted directly or paraphrased as well as for external information and data employed.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	viii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	x
ABSTRACT	xii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	
1.1 Γενικά για τους θαλάμους νεφώσεως	1-1
1.2 Απλούστεροι θάλαμοι νεφώσεως	1-2
1.3 Κύρια είδη ιχνών σε θαλάμους νεφώσεως	1-3
1.4 Ψύξη με υγρό άζωτο στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	1-4
1.4 Ψύξη με υγρό άζωτο στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	1-4
1.4 Ψύξη με υγρό άζωτο στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	1-4
1.5 Πειραματικές δοκιμές Α'	1-5
1.6 Πειραματικές δοκιμές Β'	1-7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θάλαμος νεφώσεως	
2.1 Εισαγωγή.....	2-1
2.2 Θάλαμος νεφώσεως τύπου Wilson (εκτόνωσης)	2-1
2.2.1 Αρχικός θάλαμος	2-1
2.2.2 Βελτιστοποιημένος θάλαμος.....	2-7
2.3 Θάλαμος νεφώσεως τύπου Langsdorf (διάχυσης).....	2-10
2.3.1 Γενικά	2-10
2.3.2 Διαρκώς ενεργός θάλαμος Langsdorf.....	2-10
2.3.3 Λειτουργία θαλάμου Langsdorf	2-12
2.3.4 Ίχνη από ιονισμούς λόγω φωτονίων και -β σωματιδίων	2-13
2.3.5 Ίχνη από -α σωματίδια.....	2-16
2.3.6 Ίχνη από άλλα φαινόμενα	2-17
2.3.7 Προσεγγιστική ανάλυση θαλάμου	2-17
2.4 Αρχές σχεδιασμού θαλάμου νεφώσεως τύπου διάχυσης.....	2-24
2.5 Σχόλια και συμπεράσματα.....	2-28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Απλούστεροι θάλαμοι νεφώσεως διάχυσης, μορφολογία ιχνών και ψύξη με υγρό άζωτο

3.1 Εισαγωγή.....	3-1
3.2 Θάλαμοι νεφώσεως τύπου διάχυσης.....	3-2
3.2.1 Γενικά	3-2
3.2.2 Ανοδικός θάλαμος διάχυσης.....	3-4
3.2.3 Καθοδικός θάλαμος διάχυσης	3-5
3.3 Ίχνη από ιοντίζουσες ακτινοβολίες σε θαλάμους διάχυσης.....	3-8
3.3.1 Γενικά	3-8
3.3.2 Συχνά και εύκολα παρατηρούμενα ίχνη	3-8
3.3.3 Σπανιότερα και δυσκολότερα παρατηρούμενα ίχνη	3-11
3.3.4 Σπάνια παρατηρούμενα φαινόμενα.....	3-15
3.3.5 Παραδείγματα πειραμάτων σε θάλαμο	3-15
3.4 Ψύξη με υγρό άζωτο.....	3-16
3.4.1 Γενικά	3-16
3.4.2 Υγρό άζωτο	3-17
3.4.3 Δεξαμενή αποθήκευσης υγρού αζώτου (ΕΠΤ-ΕΜΠ).....	3-18
3.4.4 Μικρά δοχεία ενδιάμεσης αποθήκευσης και μεταφοράς υγρού αζώτου.....	3-20
3.4.5 Εργαλεία πλήρωσης των δοχείων από τη δεξαμενή.....	3-21
3.4.6 Εργαλεία μετάγγισης από τα δοχεία μεταφοράς προς την τελική κατανάλωση ..	3-25
3.5 Σχόλια και συμπεράσματα.....	3-28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Προετοιμασία πειραμάτων με θάλαμο νεφώσεως τύπου διάχυσης ψυχόμενου με υγρό άζωτο-Δοκιμές Α' φάσης

4.1 Εισαγωγή.....	4-1
4.2 Βασικές τεχνικές απαιτήσεις καθοδικού θαλάμου	4-2
4.3 Ψυχόμενα δάπεδα για τις δοκιμές	4-6
4.3.1 Ψύξη με ξηρό πάγο	4-6
4.3.2 Ψύξη με υγρό άζωτο.....	4-7
4.4 Άλλες προβλέψεις εκτός από τον θάλαμο.....	4-11
4.4.1 Πηγή φωτός και χώρος παρατηρήσεων	4-11
4.4.2 Πηγές ιοντίζουσας ακτινοβολίας.....	4-11
4.5 Θάλαμος ανίχνευσης.....	4-12
4.5.1 Θάλαμος Α (Ετοιμη λύση).....	4-12

4.5.2 Θάλαμος Β (Κατασκευαστική λύση).....	4-13
4.6 Δοκιμές - φάση Α'.....	4-21
4.7 Σχόλια και συμπεράσματα.....	4-32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Πειράματα με θάλαμο διάχυσης ψυχόμενο με υγρό άζωτο - δοκιμές Β' φάσης

5.1 Εισαγωγή.....	5-1
5.2 Δοκιμές - φάση Β'.....	5-1
5.3 Προτεινόμενη τελική δοκιμή.....	5-11
5.4 Υλοποίηση τελικής δοκιμής.....	5-13
5.5 Επίλογος.....	5-19

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	B-1
--------------------------	------------

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ένας ανιχνευτής ιοντιζουσών ακτινοβολιών είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση, τον ποιοτικό χαρακτηρισμό και την ποσοτικοποίηση ιόντων, όπως αυτά που παράγονται από τις ραδιενεργές διασπάσεις, την κοσμική ακτινοβολία ή τις πυρηνικές αντιδράσεις. Οι ανιχνευτές είναι πολλών ειδών και έχουν ποικιλία δυνατοτήτων. Οι πλέον απλοί καταγράφουν απλώς τα ιόντα και άλλοι πιο σύνθετοι αναγνωρίζουν ποικίλα χαρακτηριστικά της ιοντίζουσας ακτινοβολίας που τα δημιούργησε, όπως το είδος της, την ενέργεια, το φορτίο της (αν υπάρχει) και άλλα. Οι ανιχνευτές ιοντιζουσών ακτινοβολιών χρησιμοποιούνται για να αναγνωρίζουν και να μετρούν την ακτινοβολία για παράδειγμα από κοσμικές αιτίες, από το φυσικό περιβάλλον, από τα δομικά υλικά που προκύπτουν από αυτό, από τα υπολείμματα επεξεργασίας ορυκτών, από τεχνολογικές εφαρμογές γενικά, από τα ιατρικά μηχανήματα, και από τις εφαρμογές και τα ατυχήματα της πυρηνικής τεχνολογίας. Η ανίχνευση και η μέτρηση των ιοντιζουσών ακτινοβολιών ή απλούστερα της ραδιενέργειας είναι απαραίτητη κυρίως για την προστασία του κοινού από ραδιολογικούς κινδύνους που είναι δυνατόν να προκύψουν από την ύπαρξη ή την παραγωγή και τη χρησιμοποίηση για τεχνολογικούς ή ιατρικούς σκοπούς ασταθών ισοτόπων ή από τη χρησιμοποίηση μηχανών παραγωγής ακτινοβολιών, όπως π.χ. η απλή μηχανή ακτίνων -x ή ο πολύπλοκος πυρηνικός αντιδραστήρας.

Η τεχνολογία των πρώτων ανιχνευτών προέκυψε από απλούς συλλογισμούς, βασικά από το ότι ένα ιόν που προκύπτει από ιοντίζουσα ακτινοβολία είναι πιθανόν να διαδίδεται στην ύλη για μεγαλύτερη απόσταση και περισσότερο χρόνο, αν η ύλη είναι κάποιου είδους αέριο. Με βάση αυτές τις σκέψεις αναζητήθηκε και το σήμα που μπορεί να δώσει η αλληλεπίδραση ενός τέτοιου ιόντος με ένα ελαφρύ αέριο. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα διαπιστώθηκε ότι η ανίχνευση ιόντων σε αέριο, μπορεί να γίνεται με ηλεκτρική μέτρηση, από τον τρόπο που αλλοιώνεται ένα ηλεκτρικό πεδίο στο αέριο, από την τροχιά ενός ιόντος μέσα σε αυτό. Η ανίχνευση με αυτόν τον τρόπο ήταν ένα δύσκολο τεχνολογικό πρόβλημα για την εποχή εκείνη, διότι τα απαραίτητα ηλεκτρονικά κυκλώματα δεν είχαν ακόμα αναπτυχθεί. Παράλληλα με αυτήν την τεχνολογία ανιχνευτών που ονομάστηκαν "ανιχνευτές αερίου", εφευρέθηκε και ο ανιχνευτής τύπου θαλάμου νεφώσεως, στον οποίο πάλι η ύλη που αλληλεπιδρά με τα ιόντα είναι ελαφροί οργανικοί ατμοί, διαλυμένοι, συνήθως, σε αέρα. Ο θάλαμος αυτός είναι προϊόν έρευνας που τιμήθηκε με Nobel και, παρόλο που αρχικά σχεδιάστηκε για μελέτη μετεωρολογικών φαινομένων, οδήγησε στην πρώτη ποιοτική αναγνώριση με οπτικό τρόπο ως ίχνος συμπύκνωσης ατμού, πολλών ειδών ιοντιζουσών

ακτινοβολιών, κυρίως αυτών με σωματιδιακό χαρακτήρα, όπως τα -α σωματίδια ή τα ηλεκτρόνια. Αυτή η δυνατότητα δεν υπήρχε στους ανιχνευτές αερίου. Άλλο πλεονέκτημα αυτού του ανιχνευτή είναι η απλότητά του. Η διάταξη με θάλαμο νεφώσεως, δεν έχει κινούμενα μέρη ούτε χρειάζεται ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά κυκλώματα. Παρόλη την απλότητά του όμως σε αυτόν είναι δυνατή η διαπίστωση ύπαρξης ιοντίζουσας ακτινοβολίας, η αναγνώριση του είδους της, και, σε καλούς θαλάμους, η μέτρηση της εμβέλειας της στο αέριο του θαλάμου. Το μειονέκτημα του θαλάμου είναι ότι δεν είναι φορητός ανιχνευτής και ότι δεν είναι κατάλληλος για την εύκολη ποσοτικοποίηση των μετρήσεων. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία θα παρουσιαστεί αναλυτικά η διαδικασία κατασκευής και δοκιμών ενός λεγόμενου καθοδικού θαλάμου νεφώσεως τύπου διαχύσεως. Ο θάλαμος κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε με σκοπό να χρησιμοποιείται για την οπτική παρατήρηση ιοντίζουσών ακτινοβολιών στο πλαίσιο του μαθήματος "Πυρηνικά Μετρητικά Συστήματα" που προσφέρεται από το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Ν.Π. Πετρόπουλο για τη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας και για τη συμβολή του στη διαμόρφωση του τελικού κειμένου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σωτήριο Οικονομίδα και τον Δρ. Κωνσταντίνο Καρφόπουλο από την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας για το χρόνο που διέθεσαν για να επιδείξουν σε λειτουργία τον θάλαμο νεφώσεως της ΕΕΑΕ και με αυτόν τον τρόπο να προσφέρουν βαθύτερη κατανόηση των φαινομένων που συμβαίνουν σε ένα τέτοιο θάλαμο και των ιχνών που αναμένονται λόγω ηλεκτρονίων και -α σωματιδίων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΝΕΦΩΣΕΩΣ ΨΥΧΟΜΕΝΟΥ ΜΕ ΥΓΡΟ ΑΖΩΤΟ

Διπλωματική Εργασία της Μαρίας Α. Τσίγκου

Ο πρώτος θάλαμος νεφώσεως κατασκευάστηκε το 1911 από τον Charles Thomson Rees Wilson. Ο θάλαμος αυτός ήταν μία από τις πρώτες συσκευές ανίχνευσης ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Οι ανιχνευτές ιοντιζουσών ακτινοβολιών στόχο έχουν τη διαπίστωση ύπαρξης ακτινοβολίας και αφετέρου στον προσδιορισμό του είδους της και στη μέτρησή της σε κατάλληλες μονάδες. Οι θάλαμοι νεφώσεως χρησιμοποιούνται κυρίως για τον πρώτο στόχο και διακρίνονται σε δύο τύπους. Ο πρώτος τύπος είναι ο θάλαμος νεφώσεως εκτόνωσης (δηλ. πτώσης πίεσης) ή θάλαμος Wilson, όπως ονομάστηκε έτσι από τον εφευρέτη του. Στην αρχή, ο Wilson κατασκεύασε το θάλαμο (παρατήρησης) νεφώσεως προκειμένου να μελετήσει τον τρόπο σχηματισμού νεφών υγρασίας και σχετικά με αυτόν φαινόμενα στον υγρό αέρα. Μετά από έναν αριθμό παραλλαγών θαλάμων, ο Wilson έφθασε στο συμπέρασμα ότι στο θάλαμο. Παρόλα τα πλεονεκτήματά του, ο θάλαμος νεφώσεως του Wilson είχε και σοβαρούς περιορισμούς, ο κυριότερος από τους οποίους ήταν ότι η εκτόνωση και η αντίστοιχη με αυτήν πτώση της θερμοκρασίας, η οποία και προάγει τη συμπύκνωση, είναι πολύ μικρής διάρκειας. Κατά συνέπεια ο διαθέσιμος χρόνος παρατήρησης είναι πολύ μικρός. Για να αντιμετωπίσει αυτόν τον περιορισμό, τη δεκαετία του '30, ο A. Langsdorf Jr. κατασκεύασε τ ένα θάλαμο νεφώσεως βασισόμενο στο φαινόμενο της διάχυσης ενός ελαφρού ζεστού ατμού που διαχέεται σε ένα βαρύ αέριο μέσα σε ένα πεδίο μειούμενης θερμοκρασίας. diffusion into a heavier gas within a decreasing temperature field. Το πλεονέκτημα αυτού του είδους θαλάμου ήταν η ικανότητά του να λειτουργεί για μεγάλο χρονικό διάστημα και όχι μόνο κατά τη διάρκεια μιας πολύ σύντομης εκτόνωσης. Παρόλα αυτά, ο θάλαμος του Langsdorf ήταν ιδιαίτερα πολύπλοκος, καθώς είχε στόχο τις όσο το δυνατόν πιο ακριβείς παρατηρήσεις. Μετά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο κατασκευάστηκαν αρκετοί θάλαμοι νεφώσεως τύπου διάχυσης βασισμένοι στην ίδια αρχή αλλά με πολύ απλούστερο σχεδιασμό. Οι θάλαμοι αυτοί διατήρησαν τη δυνατότητα να δημιουργούν ορατά ίχνη εξαιτίας ιοντίζουσας ακτινοβολίας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι απλές εκδοχές των θαλάμων διάχυσης διαφέρουν από αυτόν του Langsdorf κυρίως ως προς τη μέθοδο ψύξης. Οι θάλαμοι διάχυσης διακρίνονται σε δύο είδη: το ανοδικό και το καθοδικό είδος. Στον ανοδικό θάλαμο διάχυσης, η ψυχόμενη επιφάνεια είναι η οροφή, ενώ στον καθοδικό η ψυχόμενη επιφάνεια είναι το δάπεδο. Εξαιτίας

πολύ λιγότερων κατασκευαστικών απαιτήσεων, το πλέον κοινό είδος είναι ο καθοδικός θάλαμος, ο ψυχόμενος με ξηρό πάγο, ή σπανιότερα με υγρό άζωτο. Ακόμα και τέτοιοι απλοί θάλαμοι διάχυσης είναι δυνατόν να ανιχνεύουν πολλά είδη ιοντιζουσών ακτινοβολιών, αρχίζοντας από τις πλέον κοινές σωματιδιακές ακτινοβολίες, τα α και β σωματίδια, και φθάνοντας σε σπάνια φαινόμενα όπως η δίδυμη γένεση. Σε αυτήν τη Διπλωματική Εργασία:

(α) Παρουσιάζονται με συνοπτικό τρόπο, ως διατάξεις, οι θάλαμοι νεφώσεως του Wilson και του Langsdorf μαζί με τα βασικότερα μέρη της σχετικής θεωρίας, (β) Παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των απλών θάλαμοι νεφώσεως τύπου διαχύσεως με έμφαση στους καθοδικούς θαλάμους τύπου διαχύσεως. (γ) Παρουσιάζονται, στο βαθμό που χρειάζεται, οι τρόποι με τους οποίους αποθηκεύεται και διαχειρίζεται το υγρό άζωτο στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ). (δ) Κατασκευάζονται και δοκιμάζονται διάφορες εκδοχές καθοδικών θαλάμων διάχυσης ψυχόμενων με υγρό άζωτο, με οδηγό μια ομάδα από απαραίτητες προϋποθέσεις. Το υγρό άζωτο επιλέχθηκε ως ψυκτικό του θαλάμου, επειδή είναι διαθέσιμο στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για την ψύξη ανιχνευτών Γερμανίου. (ε) Μετά από μία σειρά δοκιμών ένας τελικός θάλαμος βρέθηκε εύκολος στη χρήση, λειτουργικός και κατάλληλος για πειράματα επίδειξης στο πλαίσιο των μαθημάτων ανίχνευσης ακτινοβολιών που προσφέρονται από το ΕΠΤ-ΕΜΠ.

ABSTRACT

CONSTRUCTION OF A LIQUID NITROGEN COOLED CLOUD CHAMBER

Diploma Dissertation by Maria A. Tsigkou

The first cloud chamber was built in 1911 by Charles Thomson Rees Wilson. It was one of the first ionizing radiation detection devices to be created. All radiation detectors aim, on the one hand, to detect the presence of radiation and on the other hand to determine its type and measure it in appropriate units. Cloud chambers are mainly used for the first purpose and are divided into two main types. The first type is the expansion (i.e. pressure drop) cloud chamber or Wilson chamber, named after its inventor. Originally, Wilson constructed the cloud (observation) chamber in order to study humidity cloud formation and related phenomena in humid air. After some chamber versions Wilson concluded that his design could also depict several types of ionizing radiation as condensation traces. The Wilson cloud chamber despite its advantages, had several limitations, the main one being that expansion and corresponding temperature drop, which promotes condensation, is of very short duration; therefore observation time is extremely limited. In order to cope with these limitation, in the 30's, A. Langsdorf Jr. built a cloud chamber based on warm light steam diffusion into a heavier gas within a decreasing temperature field. The advantage of this diffusion chamber was its capability to operate continuously and not only during a very short expansion phase. However, this chamber of Langsdorf was particularly complex since it was aiming to accurate observations. After World War II several diffusion cloud chambers after the same principle and of much simpler design were created. These chambers maintained the advantage of continuously creating and imaging of traces due to ionizing radiation. The simpler versions differ mainly to that of Langsdorf in the cooling method. Diffusion chambers are of two types: the upward and downward type. In the upward diffusion chamber, the cooled surface is at the roof, while in the downward chamber is the cooled surface is at the floor. Due to its much less construction requirements, the most common type is the downward diffusion chamber cooled by dry ice or, rarely, liquid nitrogen. Even simple diffusion chambers can detect multiple types of ionizing radiation, ranging from the most common of particle radiation, the $-\alpha$ and $-\beta$ particles, to rare phenomena such as annihilation. In this Diploma Dissertation: (a) The chambers implemented by Wilson and Langsdorf are reviewed in short both as constructions and also in theory. (b) The simpler chambers characteristics of the

diffusion type are presented with emphasis on the downward diffusion chambers. (c) The methods of storage and handling liquid nitrogen in the Nuclear Engineering Laboratory of NTUA (NEL-NTUA) are presented in adequate detail. (d) Downward diffusion chambers prerequisites are used as guidance for the construction and testing of a liquid nitrogen cooled cloud chamber; liquid nitrogen was chosen as the cooling agent due to its availability in NEL-NTUA for the purpose of cooling Ge detectors.(e) Following a series of tests a chamber was finalized and found easy-to-use, fit and functional for the purposes of demonstration in the framework of radiation measurement courses offered by NEL-NTUA.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά για τους θαλάμους νεφώσεως

Ως θάλαμος νεφώσεως ορίζεται ο ανιχνευτής ιοντιζουσών ακτινοβολιών που έχει τη δυνατότητα να απεικονίζει τη διέλευση ιόντων εξαιτίας ιοντίζουσας ακτινοβολίας ως ίχνος σε νέφος από κατάλληλο αέριο. Υπενθυμίζεται ότι με τον όρο ιοντίζουσα ακτινοβολία εννοούνται κυρίως τα κυριότερα είδη φορτισμένων στοιχειωδών σωματιδίων, όπως τα α -σωματίδια, τα πρωτόνια, τα ηλεκτρόνια και οι φωτονιακές ακτινοβολίες γ και x . Ένας θάλαμος νεφώσεως αποτελείται από ένα στεγανό όγκο με διαφανή τοιχώματα, στον οποίο υπάρχει (συνήθως) αέρας υπερκορεσμένος σε υγρασία ή σε ατμό κάποιας αλκοόλης. Ένα φορτισμένο σωματίδιο με ικανή κινητική ενέργεια (για παράδειγμα α ή β), το οποίο διασχίζει το αέριο λειτουργεί ως κινούμενος πυρήνας συμπυκνώσεως της διαλυμένης υγρασίας ή του διαλυμένου ατμού του μίγματος. Επειδή τα φορτισμένα σωματίδια κινούνται η συμπύκνωση παρατηρείται ως οπτικά αναγνωρίσιμη τροχιά ή ίχνος συμπυκνώματος. Ομοίως ένα φωτόνιο κατάλληλης ενέργειας, το οποίο διασχίζει το αέριο μπορεί να αλληλεπιδράσει με αυτό ιονίζοντας τα μόριά του και παράγοντας ανιόντα (δηλ. ηλεκτρόνια) και κατιόντα (δηλ. βαριά θετικά φορτισμένα άτομα). Τα ηλεκτρόνια αυτά, ως φορτισμένα σωματίδια, ανιχνεύονται με τον ίδιο όπως προηγούμενα τρόπο ως οπτικά αναγνωρίσιμα ίχνη. Τα ίχνη είναι επιμήκη νέφη υγρασίας ή ατμών από απειροστά μικρά σταγονίδια, τα οποία σχηματίζονται ασφαλώς μόνο όταν και οι θερμοδυναμικές συνθήκες είναι κατάλληλες. Τα ίχνη είναι ορατά για λίγα (το πολύ) δευτερόλεπτα, προτού διαλυθούν στο μίγμα. Τα ίχνη έχουν χαρακτηριστικά σχήματα ανάλογα και με την ακτινοβολία από την οποία προήρθαν και έτσι γίνεται δυνατή η αναγνώριση του είδους της ακτινοβολίας που προσβάλλει τον θάλαμο. Για παράδειγμα ένα α -σωματίδιο παράγει ένα μακρύ ευθύ ίχνος, ενώ ένα ηλεκτρόνιο μια κοντή τεθλασμένη γραμμή, λόγω συγκρούσεων με τα μόρια του μίγματος. Οι θάλαμοι νεφώσεως διακρίνονται σε δύο κύριους τύπους, τον θάλαμο τύπου εκτόνωσης και τον θάλαμο τύπου διάχυσης. Ο πρώτος τύπος εφευρέθηκε από τον Wilson στην αρχή του 20^{ου} αιώνα, ενώ ο δεύτερος από τον Alexander Langsdorf Jr. στο τέλος της δεκαετίας του '30. Για κάθε έναν από τους τύπους αυτούς και κυρίως για τον δεύτερο υπάρχουν πολλές παραλλαγές. Αυτοί οι δύο τύποι των θαλάμων νεφώσεως παρουσιάζονται στα βασικά τους σημεία στο Κεφάλαιο 2 τόσο ως αρχή λειτουργίας όσο και ως πειραματικές διατάξεις. Στον ιστορικό πλέον θάλαμο του πρώτου τύπου παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά με οπτικό τρόπο ίχνη ιοντιζουσών

ακτινοβολιών με πυρηνική ή κοσμική προέλευση. Λόγω της τεχνολογίας του θαλάμου, η οπτική παρατήρηση σε αυτόν διαρκούσε ελάχιστα. Ο θάλαμος του δεύτερου τύπου αποτελεί μία άλλη εκδοχή του πρώτου τύπου με βασικό πλεονέκτημα ότι ανιχνεύει ιοντίζουσες ακτινοβολίες με συνεχή τρόπο. Σύμφωνα με την παρουσίαση διαπιστώνεται ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στους δύο τύπους. Ο θάλαμος νεφώσεως τύπου διάχυσης που ξεχωρίζει για τη δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας, οδήγησε στην παραγωγή απλούστερων κατασκευών θαλάμων νεφώσεως τύπου διάχυσης, για ευρύτερη και ευκολότερη χρήση. Στους θαλάμους αυτούς είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας ψυχόμενης επιφάνειας, η οποία ψύχεται συνήθως με ξηρό πάγο (~-78 °C) και σπανιότερα με άλλα μέσα, λιγότερο διαθέσιμα, όπως το υγρό άζωτο (-196 °C). Η βαθμίδα μείωσης της θερμοκρασίας στον θάλαμο διαχύσεως τον ψυχόμενο με ξηρό πάγο είναι μεταξύ περιβάλλοντος και ψυχόμενης επιφάνειας περίπου [20 °C - (-70 °C)] = 90 °C. Οποσδήποτε, οι θάλαμοι νεφώσεως, παρότι ανιχνευτές ιοντίζουσών ακτινοβολιών, δεν θεωρούνται μετρητικές συσκευές ακτινοβολιών διότι η ανίχνευση γίνεται με οπτική παρατήρηση και όχι με παραγωγή ηλεκτρικού σήματος, όπως σε άλλους απλούς ή περισσότερο πολύπλοκους ανιχνευτές (βλ. περισσότερα στον Λεωνίδου, 1990). Επιπλέον οι συνθήκες στις οποίες παράγεται το οπτικό σήμα δεν μπορεί να είναι ακριβώς όμοιες από πείραμα σε πείραμα, λόγω της κατασκευαστικής φύσεως των θαλάμων, με αποτέλεσμα να υπάρχουν αξεπέραστα εμπόδια επαναληψιμότητας και βαθμονόμησης. Οι θάλαμοι νεφώσεως διαδραμάτισαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πειραματική σωματιδιακή φυσική από τη δεκαετία του 1920 έως και τη δεκαετία του 1950. Συγκεκριμένα, μεταξύ άλλων παρατηρήσεων, με αυτούς έγιναν οι ανακαλύψεις του ποζιτρονίου, του μιονίου και του καονίου.

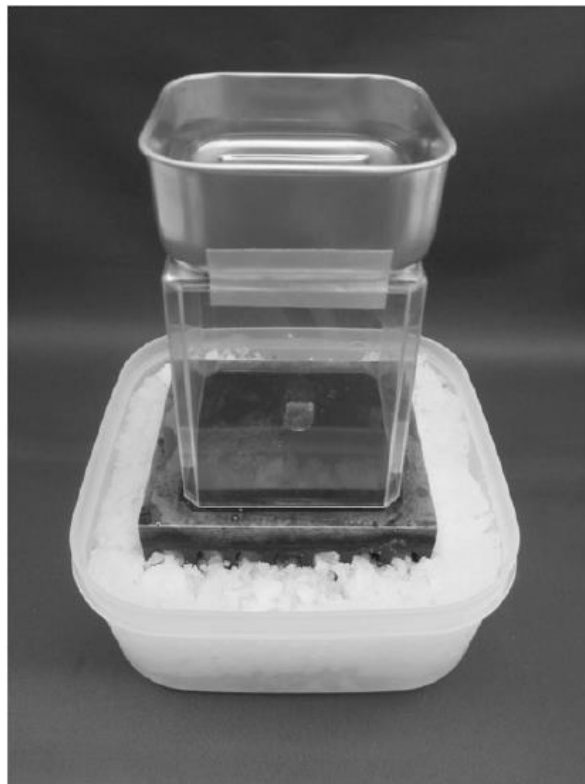
1.2 Απλούστεροι θάλαμοι νεφώσεως

Τόσο ο θάλαμος τύπου εκτόνωσης, όσο και ο θάλαμος τύπου διάχυσης είναι, στη μορφή που χρησιμοποιούνται στο εργαστηριακό περιβάλλον, πολύ σύνθετοι. Ιδιαίτερα μάλιστα ο θάλαμος Langsdorf είναι δύσκολο να ρυθμισθεί. έχει αποδειχθεί όμως ότι οι θάλαμοι νεφώσεως τύπου διάχυσης που προτάθηκαν από τον Langsdorf είναι αυτοί που μπορούν να απλοποιηθούν ώστε να γίνουν διαθέσιμοι για χρήση με λιγότερες απαιτήσεις. Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται απλούστερα είδη θαλάμων νεφώσεως τύπου διάχυσης, που προέκυψαν από τέτοιου είδους απλοποιήσεις. Οι βασικές παραλλαγές είναι δύο ο καθοδικός θάλαμος και ο ανοδικός θάλαμος διάχυσης. Οι παραλλαγές αυτές εξηγούνται επαρκώς σε επιστημονικά άρθρα, βιβλία ή και στο διαδίκτυο. Με βάση τις απλοποιήσεις ο θάλαμος νεφώσεως τύπου διάχυσης και κυρίως η καθοδική του παραλλαγή έγινε εύκολο και αποδοτικό εργαλείο

παρουσίασης και διδασκαλίας για τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες διαθέσιμο ευρύτερα για να κάνει κατανοητές τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες και στο μη εξειδικευμένο κοινό. Ενδεικτικές αναφορές υπάρχουν τόσο στην ελληνική όσο και στη διεθνή βιβλιογραφία, βλ. για παράδειγμα: Μουστάκας (2019), Lyaridevskii (1958), Agu (1973), Green (2012), Kamata (2012), Yoshinaga (2015) κ.ά. Στις Εικόνες 1.1 και 1.2 που ακολουθούν φαίνονται κάποιες από τις απλές υλοποιήσεις



Εικόνα 1.1: Η υλοποίηση καθοδικού θαλάμου διάχυσης από τον Green (2015). Κάτω: δοχείο με ξηρό πάγο. Άνω: στεγανός θάλαμος με βάση το κουτί ενός ενυδρείου.



Εικόνα 1.1: Η υλοποίηση καθοδικού θαλάμου διάχυσης από τον Yoshinaga (2015). Κάτω: δοχείο με πάγο. Άνω: δοχείο με ζεστό νερό. Στο μέσον: στεγανός θάλαμος από Plexiglass.

Ο καθοδικός θάλαμος διάχυσης είναι το είδος που δοκιμάστηκε ως κατασκευή στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας. Στο θάλαμο αυτό επιδιώχθηκε να παρατηρηθούν τα συχνά και εύκολα ίχνη από α σωματίδια, ηλεκτρόνια και δευτερογενή ηλεκτρόνια λόγω φωτονιακής ακτινοβολίας. Η περιοχή αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας με το αέριο μίγμα του θαλάμου αυτού είναι συγκριτικά μεγαλύτερη από άλλους και δίνεται και η δυνατότητα παρατήρησης των ιχνών από την οροφή, γεγονός του διευκολύνει την παρατήρηση. Ο θάλαμος κατασκευάστηκε ώστε να ψύχεται με υγρό άζωτο, το οποίο υπάρχει διαθέσιμο χωρίς σημαντικό κόστος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και για τη χρήση του υπάρχει σημαντική εμπειρία.

1.3 Κύρια είδη ιχνών σε θαλάμους νεφώσεως

Όπως είδη αναφέρθηκε, ανάλογα με το είδος και την προέλευση της ακτινοβολίας παράγονται και ίχνη διαφορετικής μορφής. Οι διαφορετικές μορφές των ιχνών επιτρέπουν την αναγνώριση του είδους της αντίστοιχης ακτινοβολίας. Συχνά και εύκολα παρατηρούμενα ίχνη είναι αυτά που οφείλονται κυρίως στα παρακάτω δύο είδη ιοντιζουσών ακτινοβολιών:

(α) Στα α σωματίδια. Τα α σωματίδια προέρχονται κατά κανόνα από διασπάσεις ασταθών πυρήνων και από πυρηνικές αντιδράσεις. Ως θετικά φορισμένα κατιόντα σχετικά μεγάλης κινητικής ενέργειας λειτουργούν ως πυρήνες συμπυκνώσεως και δημιουργούν σε θάλαμο ευθύγραμμο ίχνη σχετικά παχύτερα και μεγαλύτερου μήκους. Για την παρατήρηση α σωματιδίων σε θάλαμο, πρέπει η σχετική πηγή α σωματιδίων να τοποθετηθεί μέσα στο θάλαμο κοντά στην ευαίσθητη περιοχή. (β) Στα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια προέρχονται τόσο από διασπάσεις ασταθών πυρήνων όσο και από αλληλεπιδράσεις (σκεδάσεις) φωτονιακών ακτινοβολιών με την ύλη και αποτελούν μέρος ενός είδους ακτινοβολίας που ονομάζεται β ακτινοβολία. Τα ηλεκτρόνια είναι αρνητικά φορισμένα, έχουν πολύ μικρή μάζα και κατά κανόνα πολύ μικρότερη κινητική ενέργεια από τα α σωματίδια. Τα ηλεκτρόνια ως αρνητικά φορισμένα ιόντα λειτουργούν ως πυρήνες συμπυκνώσεως και δημιουργούν σε θάλαμο ίχνη σχετικά μικρής διαμέτρου και σχετικά μικρότερου μήκους, τεθλασμένα ή καμπυλωτά, ή (αν η ενέργειά τους είναι κατάλληλα μεγάλη) ευθύγραμμο μικρού μήκους. Για την παρατήρηση ηλεκτρονίων σε θάλαμο, πρέπει, κατά κανόνα, η σχετική πηγή ηλεκτρονίων να τοποθετηθεί μέσα στο θάλαμο κοντά στην ευαίσθητη περιοχή. (γ) Αντίστοιχα ίχνη με τα ηλεκτρόνια δημιουργούν τα ποζιτρόνια, τα οποία έχουν την ίδια μάζα με τα ηλεκτρόνια, θετικό φορτίο ίσο κατ' απόλυτη τιμή με αυτό του ηλεκτρονίου και εκπέμπονται από διασπάσεις ασταθών πυρήνων με ίδιο εύρος κινητικών ενεργειών. Τα ποζιτρόνια είναι το συμπληρωματικό υπόλοιπο μέρος της β ακτινοβολίας. Λεπτομερέστερη ανάλυση σχετικά με τη μορφή των ιχνών δίνεται στο Κεφάλαιο 3.

1.4 Ψύξη με υγρό άζωτο στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Για τη λειτουργία των θαλάμων νεφώσεως τύπου διάχυσης είναι απαραίτητη η ανάπτυξη διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ δύο παράλληλων επιφανειών: της συνήθως θερμαινόμενης οροφής και του ψυχόμενου δαπέδου. Αν η θερμαινόμενη επιφάνεια βρίσκεται στη θερμοκρασία του Εργαστηρίου, έστω 20 °C, τότε η ψυχόμενη επιφάνεια πρέπει τυπικά να βρίσκεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη κατά περίπου 90 °C. Στην πλειοψηφία των πειραμάτων με θάλαμο αυτού του είδους, η μάλλον ισχυρή ψύξη επιτυγχάνεται με τη χρήση ξηρού πάγου. Ένα άλλο ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται αρκετά σπανιότερα, κυρίως διότι δεν είναι τόσο εύκολα διαθέσιμο όσο ο ξηρός πάγος, είναι το υγρό άζωτο (-196 °C). Το υγρό άζωτο ατμοποιείται (αεριοποιείται) αμέσως αν έρθει σε επαφή με οποιοδήποτε αντικείμενο θερμότερο από αυτό. Στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ) υπάρχει διαθεσιμότητα υγρού αζώτου από ειδική δεξαμενή διότι αυτό είναι αναγκαίο για την ψύξη των ημιαγωγών ανιχνευτών γερμανίου. Με αυτό ως δεδομένο, ο θάλαμος νεφώσεως τύπου διαχύσεως που μπορεί να δοκιμασθεί στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας επιλέχθηκε να ψύχεται με υγρό άζωτο. Το υγρό άζωτο αποθηκεύεται κατάλληλα σε δοχεία ή δεξαμενές τύπου Dewar και μπορεί να μεταφέρεται και να αποθηκεύεται για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα των δοχείων, ο χρόνος διατήρησης του υγρού αζώτου ποικίλει από μερικές ώρες σε μερικές εβδομάδες. Η διαχείριση του υγρού αζώτου στο ΕΠΤ-ΕΜΠ περιγράφεται με λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 3 και περιληπτικά γίνεται ως εξής: Το άζωτο μεταφέρεται από τις κεντρικές εγκαταστάσεις από το εργοστάσιο παραγωγής και αποθηκεύεται υπό πίεση σε τοπική δεξαμενή Dewar 1000 L. Η λήψη υγρού αζώτου από τη δεξαμενή γίνεται για την πλήρωση μικρότερων δοχείων Dewar για την ενδιάμεση αποθήκευση και μεταφορά υγρού αζώτου ονομαστικής χωρητικότητας 60 ή 30 L. Για την πλήρωση των δοχείων από τη δεξαμενή, χρησιμοποιούνται μέθοδοι και εργαλεία, οι λεπτομέρειες των οποίων δίνονται στο Κεφάλαιο 3. Για τη μετάγγιση του υγρού αζώτου από τα δοχεία προς τις τελικές καταναλώσεις (δηλαδή, στην περίπτωση της Διπλωματικής Εργασίας, τον θάλαμο διαχύσεως) χρησιμοποιούνται άλλοι μέθοδοι και εργαλεία, οι λεπτομέρειες των οποίων δίνονται επίσης στο Κεφάλαιο 3.

1.5 Πειραματικές δοκιμές Α'

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται διάφορες δοκιμές με κατασκευαστικές υλοποιήσεις καθοδικού θαλάμου νεφώσεως τύπου διάχυσης με βάση τα θεωρητικά και τα κατασκευαστικά στοιχεία για θαλάμους αυτού του είδους, όπως παρουσιάστηκαν στα

προηγούμενα Κεφάλαια. Ο θάλαμος αυτού του τύπου, προσφέρεται για δοκιμές καθώς είναι πολύ απλούστερος από εκείνον που πρότεινε ο Wilson παλαιότερα και έναντι του εξίσου απλού ανοδικού θαλάμου επιτρέπει την ευκολότερη παρατήρηση των ιχνών. Οι κατασκευαστικές αυτές υλοποιήσεις πραγματοποιήθηκαν κυρίως για να αναδειχθούν τα προβλήματα που μπορούν να παρουσιάζουν τέτοιες κατασκευές και μάλιστα κατασκευές που ψύχονται με υγρό άζωτο. Ο στόχος ήταν να προκύψει ένας θάλαμος δια του οποίου θα μπορεί με απλό τρόπο να βοηθηθούν τα εργαστηριακά μαθήματα που αφορούν στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες, τα οποία προσφέρονται σε προπτυχιακό επίπεδο από το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Οδηγίες για τις δοκιμαστικές κατασκευές αντλήθηκαν ασφαλώς από τα προηγούμενα Κεφάλαια, αλλά και από διάφορες πηγές του διαδικτύου, τόσο από διαδικτυακά κείμενα, όσο και από οπτικοακουστικές επιδείξεις (βίντεο στα διάφορα διαδικτυακά "tubes"). Οι απαιτήσεις που έπρεπε να ικανοποιηθούν στις δοκιμές ήταν αρκετές. Χαρακτηριστικά αναφέρονται ως σημαντικότερες: (i) η ψύξη του ψυχόμενου δαπέδου στην κατάλληλη θερμοκρασία, (ii) η γεωμετρία και οι διαστάσεις του θαλάμου, (iii) τα υλικά κατασκευής σε συνδυασμό με τα αναγκαία διαφανή παράθυρα για παρατηρήσεις, (iv) ο κατάλληλος φωτισμός μαζί με τις κατάλληλες συνθήκες υψηλής αντίθεσης, (v) το είδος θερμού ατμού προς διάχυση σε αέρα υπό ατμοσφαιρική πίεση σε κατάλληλο πεδίο θερμοκρασίας, (vi) πηγές κατάλληλης ιοντίζουσας ακτινοβολίας, όλα αυτά δηλαδή που είναι προϋποθέσεις για ποιοτικές οπτικές και φωτογραφικές παρατηρήσεις των ιχνών. Οι πρώτες πειραματικές δοκιμές (δοκιμές Α') πραγματοποιήθηκαν με θάλαμο με λεπτά τοιχώματα από διαφανές ακρυλικό πλαστικό. Ο τυπικός όγκος του θαλάμου ήταν στην περιοχή των περίπου 3 L με κοντινές τιμές των διαστάσεων ύψους, μήκους και πλάτους. Στις δοκιμές δόθηκε έμφαση σε διάφορους τρόπους ψύξης με υγρό άζωτο, το οποίο είναι ένα από τα ζητούμενα στη Διπλωματική Εργασία. Σχεδόν όλες οι δοκιμές της φάσης αυτής έγιναν με ατμούς αιθανόλης. Κατά κανόνα δεν παρατηρήθηκαν ίχνη, κυρίως διότι η ορατότητα ήταν περιορισμένη για διάφορες αιτίες. Για παράδειγμα δεν διευκόλυναν τα νέφη αζώτου, τα νέφη από συμπυκνωμένη υγρασία της ατμόσφαιρας, θολότητα λόγω συμπύκνωσης υγρασίας στα εξωτερικά τοιχώματα του θαλάμου, τα κατακόρυφα τοιχώματα των δοχείων γύρω από το ψυχόμενο δάπεδο και η αδυναμία παρατήρησης από την οροφή. Επιπλέον ο διαχεόμενος ατμός της αλκοόλης σχημάτιζε νέφος τύπου ευαίσθητης περιοχής σε πολύ χαμηλό ύψος πάνω από την ψυχόμενη επιφάνεια. Προέκυψε επομένως η ανάγκη προσεκτικότερων και καλύτερων πειραματικών δοκιμών ώστε στο βαθμό που είναι δυνατόν, να αρθούν τα εμπόδια που παρατηρήθηκαν.

1.6 Πειραματικές δοκιμές Β'

Δίνοντας βάρος, κατά τις πρώτες πειραματικές δοκιμές, στη μέθοδο ψύξης με υγρό άζωτο προέκυψε ότι αγνοήθηκαν άλλες απαιτήσεις, όπως π.χ. η ανάγκη για όσο το δυνατόν καλύτερα μονωμένο θάλαμο, η ανάγκη για καλή ορατότητα και η ανάγκη για όσο το δυνατόν λιγότερες διαρροές από το μίγμα ατμών - αερίου. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται μια επόμενη σειρά από δοκιμές (Β' φάσης), στις οποίες δίνεται περισσότερη προσοχή στα προβλήματα που εντοπίστηκαν στην Α' φάση. Για το σκοπό αυτό οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με άλλο θάλαμο. Η διαφορά του νέου θαλάμου από τον προηγούμενο ήταν κυρίως στο πάχος των διαφανών τοιχωμάτων. Ο τυπικός όγκος παρέμεινε περίπου ίδιος. Επιπλέον για τις δοκιμές αυτές χρησιμοποιήθηκε ειδική διάταξη, εξ' ολοκλήρου μεταλλική για το ψυχόμενο δάπεδο με υγρό άζωτο, η οποία δεν προάγει, τα νέφη, ούτε τον πάγο, ούτε έχει τοιχώματα που εμποδίζουν την ορατότητα. Ο τρόπος κατασκευής αυτού του ψυχόμενου δαπέδου προέκυψε από τις πειραματικές δοκιμές Α'. Όλες οι δοκιμές της Β' φάσης έγιναν με ατμούς αιθανόλης. Στις δοκιμές της δεύτερης φάσης παρατηρήθηκαν ίχνη τόσο από ηλεκτρόνια όσο και από -α σωματίδια.

Με βάση τις δοκιμές και τα συμπεράσματα που προέκυψαν κρίνεται ότι ικανοποιήθηκε ο σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας, δηλαδή η κατασκευή ενός απλού, χαμηλού κόστους, εύχρηστου και λειτουργικού θαλάμου νεφώσεως για παρατηρήσεις που να εξυπηρετούν τους εκπαιδευτικούς σκοπούς των μαθημάτων των σχετικών με ραδιενεργές ακτινοβολίες, την μέτρηση και την ανίχνευσή τους και ιδιαιτέρως το μάθημα "Πυρηνικά Μετρητικά Συστήματα".

Στο τέλος του Κεφαλαίου 5 δίνονται προτάσεις για πειράματα επίδειξης που μπορούν να πραγματοποιηθούν με θάλαμο νεφώσεως τύπου διάχυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΑΛΑΜΟΣ ΝΕΦΩΣΕΩΣ

2.1 Εισαγωγή

Ως θάλαμος νεφώσεως ορίζεται ο ανιχνευτής ιοντιζουσών ακτινοβολιών που έχει τη δυνατότητα να απεικονίζει τη διέλευση ιόντων που παράγονται από ιοντίζουσα ακτινοβολία ως ίχνος σε νέφος από κατάλληλο αέριο. Οι θάλαμοι νεφώσεως διακρίνονται σε δύο κύριους τύπους, τον θάλαμο εκτόνωσης (expansion cloud chamber) και τον θάλαμο διάχυσης (diffusion cloud chamber). Ο θάλαμος του πρώτου τύπου εφευρέθηκε από τον Charles Thomson Rees Wilson το 1911, ενώ του δεύτερου από τον Alexander Langsdorf Jr το 1939. Για κάθε έναν από τους τύπους αυτούς υπάρχουν πολλές παραλλαγές. Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζονται με αρκετή λεπτομέρεια αυτοί οι δύο τύποι των θαλάμων νεφώσεως. Για το σκοπό αυτό αναλύεται η αρχή λειτουργίας και ο τρόπος κατασκευής των θαλάμων αυτών. Πρώτα αναλύεται ο θάλαμος νεφώσεως Wilson, ο οποίος είναι από τους πρώτους ανιχνευτές ιοντιζουσών ακτινοβολιών που κατασκευάστηκε και αποτέλεσε το εφαλτήριο για την κατασκευή ποικίλων άλλων ανιχνευτών (π.χ. αερίου, ιονισμού, σπινθηρισμού κ.ά.). Η σημασία του είναι ιστορική, καθώς χάρη σε αυτόν για πρώτη φορά παρατηρήθηκαν ορατά ίχνη ιοντιζουσών ακτινοβολιών με πυρηνική ή κοσμική προέλευση. Ο θάλαμος νεφώσεως Langsdorf που αναλύεται στη συνέχεια, είναι μία σύνθετη κατασκευή, η οποία αποτελεί μία πολύ βελτιωμένη εκδοχή του αρχικού θαλάμου Wilson. Το βασικότερο πλεονέκτημά της είναι ότι είναι κατασκευασμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να ανιχνεύει ακτινοβολίες με συνεχή τρόπο.

2.2 Θάλαμος νεφώσεως τύπου Wilson (εκτόνωσης)

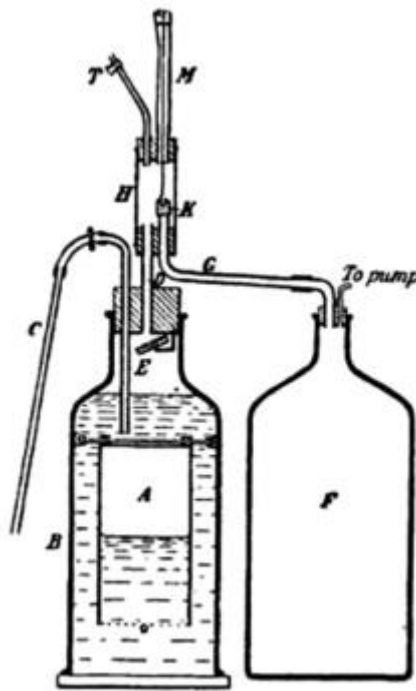
2.2.1 Αρχικός θάλαμος

Ο φυσικός Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959), από τη Σκωτία είναι ο εφευρέτης της ομώνυμης κατηγορίας θαλάμων νεφώσεως. Ο θάλαμος αρχικά κατασκευάστηκε για τη μελέτη του τρόπου σχηματισμού νεφών και της παραγωγής οπτικών φαινομένων στον υγρό αέρα της ατμόσφαιρας. Πιο συγκεκριμένα, στις αρχές του 1895, ο Wilson ξεκίνησε μια σειρά πειραμάτων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εκτόνωσης του υγρού αέρα που αναπτύχθηκε από

τον Coulier¹ και τον Aitken², για τη δημιουργία τεχνητών νεφών. Ο Aitken είχε καταλήξει στα εξής αρχικά συμπεράσματα:

- Όταν οι υδρατμοί συμπυκνώνονται στην ατμόσφαιρα, το κάνουν, κατά τη γνώμη του, πάντα γύρω από κάποιο στερεό πολύ μικρής διαμέτρου που ονομάστηκε συμβατικά "πυρήνας συμπυκνώσεως".
- Τα σωματίδια σκόνης στον αέρα σχηματίζουν πυρήνες συμπυκνώσεως, γύρω από τους οποίους συμπυκνώνονται οι υδρατμοί.
- Αν δεν υπήρχε σκόνη στον αέρα μπορεί να μην υπήρχαν ούτε ομίχλες ούτε σύννεφα, και πιθανότατα ούτε βροχή.

Ο Wilson, που ήταν εξοικειωμένος με τα πειράματα και τα συμπεράσματά του Aitken, βελτίωσε σημαντικά την απόδοση μιας συσκευής συμπύκνωσης, κατασκευάζοντας έναν πρώτο θάλαμο νεφώσεως που φαίνεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Ο πρώτος θάλαμος νεφώσεως του Wilson (βλ. Longair, 2014)

Στον θάλαμο αυτόν, υπήρχε η δυνατότητα ταχείας εκτόνωσης αέρα κορεσμένου σε υδρατμό στο χώρο *A* με τη βοήθεια κενού που δημιουργούνται στον χώρο *F* και το οποίο εφαρμοζόταν απότομα στον χώρο *A* μέσω κατάλληλων σωληνώσεων και βαλβίδων. Επιπλέον, ήταν δυνατόν να ελέγχεται με μεγάλη ακρίβεια ο λόγος του τελικού όγκου *V* προς

¹ P.-J. Coulier (1824-1890), Πειράματα εκτόνωσης αέρα, 1875

² J. Aitken (1839-1919), Μετεωρολόγος, University of Glasgow

τον αρχικό όγκο V_0 του αέρα αυτού, παρατηρώντας τη στάθμη στο χώρο A . Με αυτή τη συσκευή, ο Wilson διαπίστωσε ότι, συμπληρωματικά με τα συμπεράσματα του Aitken,

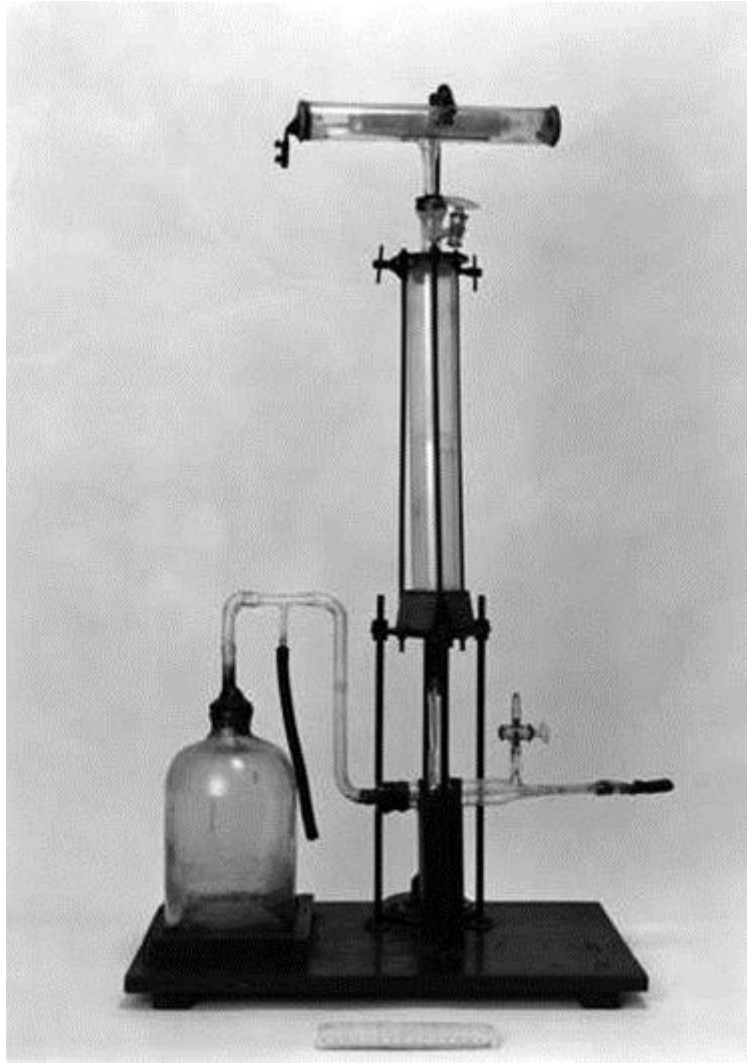
Τα σωματίδια σκόνης δεν ήταν αναγκαία προϋπόθεση για την πρόκληση συμπύκνωσης.

Επιπλέον διαπίστωσε ότι:

Στον χωρίς σκόνη αέρα δεν εμφανίζεται συμπύκνωση υγρασίας, εκτός αν ο λόγος εκτόνωσης V/V_0 πάρει τιμή μεγαλύτερη από 1.252.

Ο Wilson συνέχισε τα πειράματά του κατασκευάζοντας μία ακόμα καλύτερη πειραματική διάταξη, στην οποία η εκτόνωση των υδρατμών από όγκο V_0 σε μεγαλύτερο όγκο V μπορούσε να λάβει χώρα, σε ένα εκατοστό του δευτερολέπτου ως ισεντροπική (αδιαβατική και αναστρέψιμη) μεταβολή τελείου αερίου.

Το Φεβρουάριο του 1896, ο Wilson χρησιμοποίησε έναν από τους πρώτους σωλήνες παραγωγής ακτίνων x , για να φωτίσει τον χώρο A . Παρατηρήθηκε ότι δημιουργήθηκε μια πυκνή ομίχλη, όταν ο λόγος εκτόνωσης V/V_0 ξεπέρασε το 1.252. Συνακόλουθα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι πυρήνες συμπύκνωσης σε αυτήν την περίπτωση ήταν τα φορτισμένα ιόντα, τα οποία δημιουργήθηκαν από την αλληλεπίδραση των ακτίνων x με τους υδρατμούς. Η συσκευή του υπόψη πειράματος διακρίνεται στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Φωτογραφική απεικόνιση του θαλάμου νεφώσεως από το εργαστήριο Cavendish (βλ. Longair, 2014)

Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώθηκε όταν στον χώρο A αναπτύχθηκε ένα ηλεκτρικό πεδίο συνεχούς ρεύματος μεταξύ δύο παράλληλων πλακών: μίας αρνητικά φορτισμένης και μίας θετικά φορτισμένης. Όταν υπήρχε ηλεκτρικό πεδίο, τα φορτισμένα ιόντα λόγω αλληλεπιδράσεων κατευθύνονταν προς τις πλάκες πριν πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε συμπύκνωση.

Με τη βοήθεια αυτών των πειραμάτων με ακτίνες $-x$, ο Wilson κατέληξε ότι ο σχηματισμός νεφών στον αέρα συνδέεται με τον κορεσμό του αέρα σε υδρατμό. Τα πολύ προσεκτικά πειράματά του σχεδιάστηκαν, για να καθορίσουν ακριβώς, ποιος βαθμός κορεσμού ήταν απαραίτητος για την παραγωγή συμπύκνωσης χωρίς την παρουσία άλλων παραγόντων που την προάγουν (όπως π.χ. η σκόνη). Ο ελάχιστος αναγκαίος κορεσμός προσδιορίστηκε από το λόγο του όγκου V του υδρατμού μετά την εκτόνωση προς τον όγκο V_0 του (ίδιου) υδρατμού πριν την εκτόνωση. Δεδομένου ότι η εκτόνωση στα πειράματα του Wilson πραγματοποιείται

γρήγορα (σε ένα εκατοστό του δευτερολέπτου) η σχετική μεταβολή θεωρείται ισεντροπική και η αρχική "0" και η τελική πίεση στο χώρο A συνδέονται με τους όγκους από τον νόμο:

$$\frac{p_0}{p} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^\gamma \quad (2.1)$$

όπου ως γνωστό ο ισεντροπικός εκθέτης γ δίνεται από το λόγο των θερμοχωρητικοτήτων:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (2.2)$$

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, η μερική πίεση κορεσμού των υδρατμών εξαρτάται πολύ έντονα από τη θερμοκρασία, η οποία δίνεται σε βαθμούς Κελσίου. Μια μικρή ισεντροπική εκτόνωση, όπως αυτή στα πειράματα του Wilson οδηγεί σε μια σχετικά μικρή αλλαγή της θερμοκρασίας. Αν στην εξίσωση (2.1) γίνουν αντικαταστάσεις χρησιμοποιώντας την καταστατική εξίσωση τελείου αερίου:

$$pV = nRT \quad (2.3)$$

τότε μπορεί να γράφεται για μονάδες Kelvin:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{-(\gamma-1)} \quad (2.4)$$

Αυτή όμως η μικρή αλλαγή θερμοκρασίας αντιστοιχεί σε μια μεγάλη μείωση στην μερική πίεση κορεσμού των υδρατμών και επομένως σε μία μεγάλη αύξηση της μάζας του νερού που μπορεί να παραμένει διαλυμένο στον αέρα χωρίς να εμφανίζεται συμπύκνωση υγρασίας σε διάφορες μορφές (ομίχλη, σταγονίδια νεφών, βροχή). Από τα πειράματα του Wilson και με τη βοήθεια των ακτίνων -x διαπιστώθηκε ότι διαφορετικοί τύποι συμπύκνωσης, εμφανίζονται σε διαφορετικούς λόγους εκτόνωσης V/V_0 , όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 2.2. Όταν ο λόγος V/V_0 φθάνει την κατώτερη τιμή 1.252, εμφανίζεται έντονη συμπύκνωση υπό μορφή "βροχής". Σε αυτήν την περίπτωση ως πυρήνες συμπύκνωσης θεωρήθηκαν τα αρνητικά ιόντα από τις αλληλεπιδράσεις των ακτίνων -x με τον υδρατμό. Όταν ο λόγος V/V_0 έχει ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή που δεν είναι μικρότερη από περίπου 1.31, εμφανίζεται λιγότερο έντονη συμπύκνωση με μορφή "σαν βροχή". Σε αυτήν την περίπτωση ως πυρήνες συμπύκνωσης θεωρήθηκαν τα αρνητικά ιόντα από τις αλληλεπιδράσεις των ακτίνων -x με τον υδρατμό. Τέλος, όταν ο λόγος V/V_0 παίρνει τιμή που δεν είναι μικρότερη από περίπου 1.38 εμφανίζεται ακόμα λιγότερο έντονη συμπύκνωση με μορφή "σαν ομίχλη". Σε αυτήν την περίπτωση ως πυρήνες συμπύκνωσης θεωρήθηκαν τα ίδια τα μόρια του αέρα. Ο Wilson

απέδωσε τη διαφορά μεταξύ της συμπύκνωσης "βροχή" και της συμπύκνωσης "σαν βροχή", στο ότι τα θετικά ιόντα (ΣΣ: δηλ. τα βαριά κατιόντα ιονισμένων ατόμων) κινούνται λόγω μεγαλύτερης μάζας πολύ βραδύτερα από τα αρνητικά ιόντα (ΣΣ: δηλ. τα ηλεκτρόνια). Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, οι Wilson και Thomson³ πρότειναν, ότι, για την εξήγηση του σχηματισμού των νεφών και την παραγωγή φαινομένων όπως οι κεραυνοί και οι αστραπές, πρέπει να ληφθούν υπόψη, όχι μόνο το αρνητικό φορτίο στην επιφάνεια της γης αλλά και τα αρνητικά και θετικά ιόντα που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα (ΣΣ: π.χ. αυτά που παράγονται από την κοσμική ακτινοβολία).

Πίνακας 2.1: Η εξάρτηση της μερικής πίεσης κορεσμού υδρατμών από τη θερμοκρασία (βλ. Longair, 2014)

Θερμοκρασία (°C)	Μερική Πίεση Κορεσμού υδρατμού (kPa)
0	0.6
5	0.9
10	1.2
15	1.7
20	2.3
25	3.2

Πίνακας 2.2: Τύποι συμπύκνωσης για διάφορες εκτονώσεις μέσα σε πεδίο ιόντων (βλ. Longair, 2014)

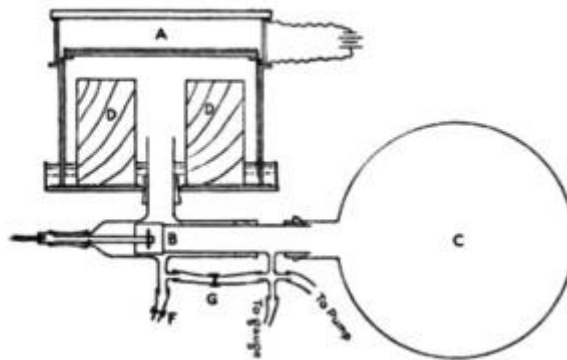
V/V_0	Τύπος συμπύκνωσης	Πυρήνες συμπύκνωσης
1.252	"Βροχή σταγονιδίων"	Αρνητικά ιόντα
1.31	"Σαν βροχή"	Θετικά ιόντα
1.38	"Σαν ομίχλη"	Μόρια αέρα

³ J.J. Thomson (1856-1940), Προϊστάμενος στο Εργαστήριο Cavendish, University of Cambridge

Με τη βοήθεια θαλάμου νεφώσεως παρόμοιου με του Wilson, ο Thomson πραγματοποίησε παρατηρήσεις που με εφαρμογή σχετικά απλών θερμοδυναμικών υπολογισμών τον οδήγησαν στις πρώτες εκτιμήσεις για το φορτίο του ηλεκτρονίου. Η πρώτη τιμή φορτίου που προσδιορίστηκε ήταν 5×10^{-19} Coulomb, περίπου τρεις φορές η σημερινή ακριβής τιμή για το φορτίο του ηλεκτρονίου, ενώ η τελική τιμή του φορτίου του ηλεκτρονίου στην οποία κατέληξε (το 1898) ήταν 2.2×10^{-19} Coulomb, πραγματικά πολύ κοντά στη σημερινή ακριβή τιμή που είναι ίση με 1.602×10^{-19} Coulomb.

2.2.2 Βελτιστοποιημένος θάλαμος

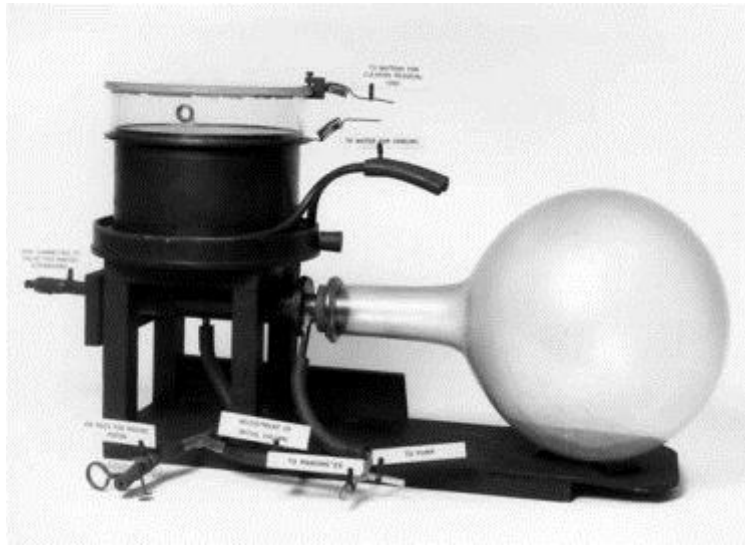
Ο Wilson συνέχισε τη βελτίωση του θαλάμου του μέχρι και το 1911. Ήδη από το 1910 η φύση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας είχε γίνει καλύτερα κατανοητή. Για παράδειγμα τα πειράματα του Rutherford είχαν δείξει ότι τα α σωματίδια ήταν πυρήνες ατόμων ηλίου. Ο Wilson προσπάθησε να απεικονίσει στο βελτιστοποιημένο θάλαμό του τα ίχνη από σωματιδιακές ακτινοβολίες (α σωματίδια ή ηλεκτρόνια) φωτογραφίζοντας τα σταγονίδια συμπύκνωσης υδρατμού που δημιουργούνται κατά μήκος της διαδρομής αυτών των ακτινοβολιών. Για το σκοπό αυτό, ο βελτιστοποιημένος θάλαμος απέκτησε διαφορετική διαμόρφωση όπως στο σκαρίφημα της Εικόνας 2.3, τα βασικότερα χαρακτηριστικά της οποίας ήταν:



Εικόνα 2.3: Σκαρίφημα του βελτιστοποιημένου θαλάμου νεφώσεως Wilson (~1910)
(βλ. Longair, 2014)

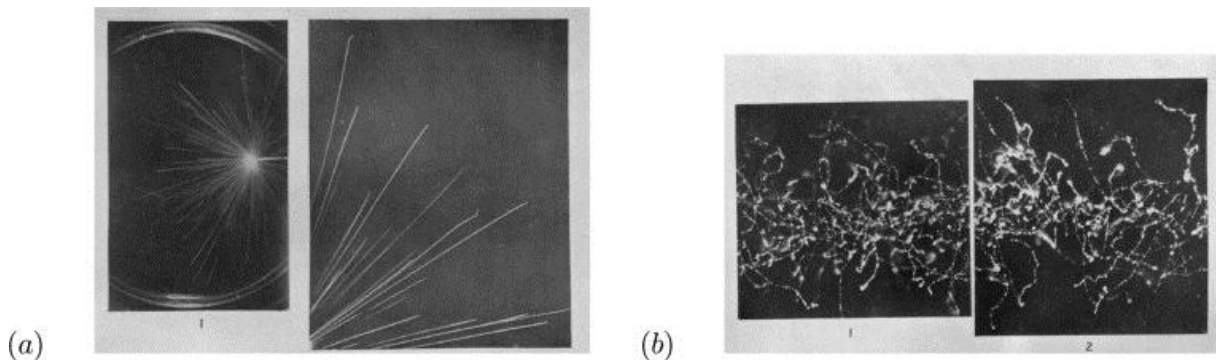
- Αρκετά μεγαλύτερος χώρος εκτόνωσης (χώρος A στην Εικόνα 2.1, χώρος C στην Εικόνα 2.3)
- Χώρος εκτόνωσης προσβάσιμος σε φωτογράφιση, χωρίς άλλα ενδιάμεσα οπτικά εμπόδια.
- Δυνατότητα λήψης φωτογραφικών στιγμιότυπων ταυτόχρονα με την εκτόνωση.

Ο Wilson έλαβε τις πρώτες εικόνες από τα α και β σωματιδίων, χρησιμοποιώντας τέτοιο βελτιστοποιημένο θάλαμο νεφώσεως το 1911. Φωτογραφία του βελτιστοποιημένου θαλάμου δίνεται στην Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4: Ο βελτιστοποιημένος θαλάμος νεφώσεως στο εργαστήριο Cavendish (βλ. Longair, 2014)

Η ποιότητα των φωτογραφικών στιγμιότυπων ήταν εξαιρετική. Ακολουθούν δύο χαρακτηριστικές φωτογραφίες με τα ίχνη, που δημιουργούνται στους θαλάμους νεφώσεως (βλ. την Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5: (α) Εικόνες ιχνών α σωματιδίων από τη ραδιενεργό διάσπαση του ραδίου-226
(β) Εικόνες ιχνών β σωματιδίων από την αλληλεπίδραση ακτίνων x με τον υδρατμό (βλ. Longair, 2014)

Με την αυτοματοποίηση του θαλάμου νεφώσεως, ο Blackett (1960) μπόρεσε να λάβει πολλές εικόνες ιχνών από σωματιδιακές ακτινοβολίες και μεταξύ αυτών ήταν και εικόνες από σωματιδιακά προϊόντα πυρηνικών αντιδράσεων.

Μεταξύ των πολλών ανακαλύψεων που έγιναν από τη χρήση του θαλάμου νεφώσεως Wilson ξεχωρίζουν:

- Το ποζιτρόνιο
- Η δίδυμη γένεση
- Διάφορες εκφάνσεις της κοσμικής ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένων των μιονίων

Παρότι, επομένως, η εφεύρεση του θαλάμου νεφώσεως προέκυψε από την πειραματική μελέτη για την κατανόηση του σχηματισμού σταγονιδίων νερού στα σύννεφα, κατέληξε να χρησιμοποιείται για την κατανόηση των πυρηνικών αλληλεπιδράσεων.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του θαλάμου Wilson είναι τα ακόλουθα:

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της εμβέλειας και ως εκ τούτου της κινητικής ενέργειας σωματιδιακών ακτινοβολιών (φορτισμένων ιόντων).
- Το είδος της σωματιδιακής ακτινοβολίας μπορεί να προσδιοριστεί από τη μελέτη της μορφής του ίχνους συμπυκνώσεως που αυτό παράγει. Για παράδειγμα προκύπτει εύκολα η διάκριση μεταξύ ενός α -σωματιδίου και ενός ηλεκτρονίου ($-\beta$ σωματιδίου)
- Η ορμή του φορτισμένου ιόντος, μπορεί να εκτιμηθεί από τη μέτρηση της ακτίνας καμπυλότητας της τροχιάς ενός ίχνους συμπυκνώσεως σε ένα μαγνητικό πεδίο.
- Το πρόσημο του ηλεκτρικού φορτίου ενός φορτισμένου ιόντος μπορεί να προσδιοριστεί σημειώνοντας την τροχιά ενός ίχνους συμπυκνώσεως σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Το γεγονός αυτό βοήθησε στην ανακάλυψη του ποζιτρονίου.

Και αντίστοιχα οι κυριότεροι περιορισμοί του θαλάμου Wilson είναι:

- Η εμβέλεια ενός σωματιδίου ακτινοβολίας μπορεί να υπερβαίνει τη διάσταση του θαλάμου και έτσι, πολλές φορές, δεν μπορεί να φωτογραφηθεί και να μετρηθεί ακριβώς ολόκληρο το ίχνος.
- Τα ίχνη συμπυκνώσεως από ιόντα σχηματίζονται σε ένα αέριο, το οποίο έχει πολύ χαμηλή πυκνότητα. Επομένως η πιθανότητα εμφάνισης ιχνών συμπυκνώσεως εντός του θαλάμου είναι αρκετά χαμηλή με συνέπεια να ανιχνεύεται μέσω συμπύκνωσης μόνο ένα μικρό μέρος ιόντων.

Στον Wilson απονεμήθηκε το 1927 βραβείο Νόμπελ Φυσικής, από κοινού με τον Compton⁴.

⁴ A.H. Compton (1892-1962), Δρ. Φυσικός, Princeton University

2.3 Θάλαμος νεφώσεως τύπου Langsdorf (διάχυσης)

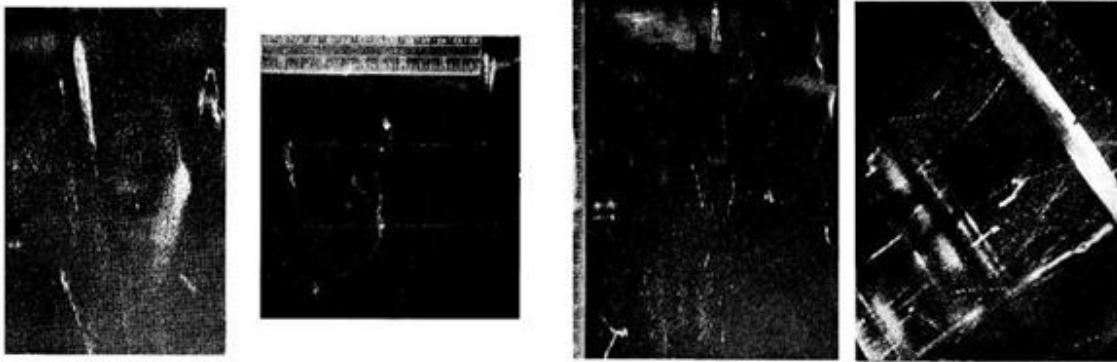
2.3.1 Γενικά

Το 1939 ο A. Langsdorf Jr. κατασκεύασε ένα θάλαμο νεφώσεως βασιζόμενο στο φαινόμενο της διάχυσης, με σκοπό να δημιουργήσει έναν ανιχνευτή κατάλληλο για τη διαπίστωση σωματιδιακών ακτινοβολιών, ο οποίος να μπορεί να λειτουργεί συνεχώς και όχι μόνο κατά τη φάση εκτόνωσης. Με άλλα λόγια ο Langsdorf Jr. θέλησε να βελτιώσει το θάλαμο νεφώσεως τύπου εκτόνωσης και να μειώσει τους περιορισμούς του σε ό,τι αφορά στην ανίχνευση ιόντων. Ένας θάλαμος νεφώσεως τύπου Langsdorf θα διευκόλυνε καλύτερα ορισμένους τύπους πειραμάτων, που έχουν πραγματοποιηθεί και με θάλαμο νεφώσεως τύπου εκτόνωσης (Wilson). Ο Langsdorf Jr. σκέφθηκε ότι για να εξασφαλισθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη και συνεχής λειτουργία ενός θαλάμου νεφώσεως, θα πρέπει το νέφος να παράγεται με διαφορετικό τρόπο από αυτόν της εκτόνωσης υγρού αέρα. Η βασική ιδέα έχει ως εξής: Αντί να δημιουργούνται συνθήκες συμπύκνωσης υγρασίας στον αέρα μέσω ισεντροπικής πτώσης πίεσης (βλ. εξίσωση 2.1) είναι επίσης δυνατόν να δημιουργούνται συνθήκες συμπύκνωσης δημιουργώντας ένα περιβάλλον, όπου στον ίδιο περίπου όγκο παρατηρείται μία μείωση θερμοκρασίας, στο εύρος της οποίας η μερική πίεση του υδρατμού είναι κατάλληλη για τη δημιουργία συμπυκνωμάτων. Για το σκοπό αυτό έγιναν δοκιμές ως εξής: Υγρός αέρας οδηγείται πάνω από νερό 70 °C προκειμένου να θερμανθεί. Στη συνέχεια, ο αέρας αυτός οδηγείται πάνω από νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος προκειμένου να δημιουργηθούν συνθήκες συμπύκνωσης που να διαρκούν. Φυσικά υπήρξαν και άλλες ιδέες για ένα θάλαμο, στον οποίο συνθήκες συμπύκνωσης διατηρούνται αρκετό χρόνο. Αναφέρονται δοκιμές με ηλεκτρικές εκκενώσεις καθώς και ανάμιξη ατμών από διαφορετικά μέσα, όπως υδρατμοί και ατμοί υδροχλωρικού οξέως.

2.3.2 Διαρκώς ενεργός θάλαμος Langsdorf

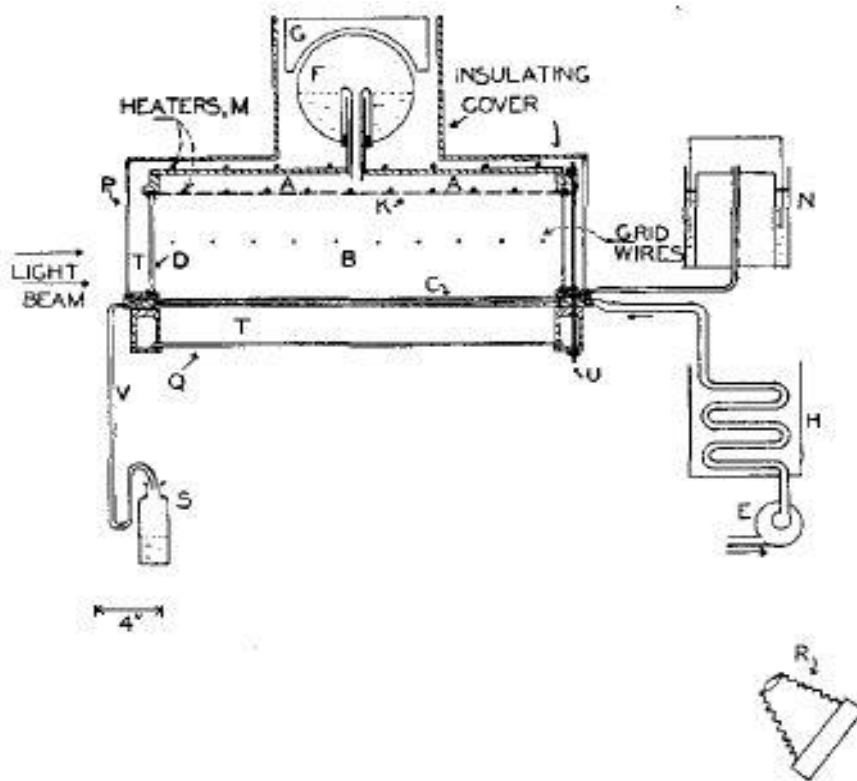
Στον θάλαμο Langsdorf οι συνθήκες συμπύκνωσης δημιουργούνται και συντηρούνται με τη βοήθεια θερμών ατμών μεθανόλης διαχεόμενου σε συνθήκες κορεσμού σε αέριο διοξείδιο του άνθρακα. Το μίγμα οδηγείται κατάλληλα σε χώρο με χαμηλότερη θερμοκρασία προκειμένου για τη δημιουργία συνθηκών συμπύκνωσης. Ένας θάλαμος νεφώσεως, που λειτουργεί με τέτοιο ή παρόμοιο τρόπο, ανήκει στους θαλάμους τύπου διάχυσης. Στην Εικόνα 2.6 φαίνονται φωτογραφίες ιχνών συμπυκνώσεως γύρω από τροχιές ιόντων, που παρατηρήθηκαν σε αυτόν το θάλαμο νεφώσεως τύπου διάχυσης. Τέτοια ίχνη, μπορούν να παράγονται συνεχώς από την κοσμική ακτινοβολία και τη ραδιενέργεια του φυσικού περιβάλλοντος. Δεδομένου ότι το περιβάλλον περιέχει από τη φύση του αρκετές πηγές

ιοντιζουσών ακτινοβολιών, γενικά δεν χρειάζεται άλλη ειδική πηγή για να παραχθούν παρατηρήσιμα ίχνη.



Εικόνα 2.6: Διάφορες φωτογραφίες ιχνών ιόντων από θάλαμο νεφώσεως τύπου διάχυσης (βλ. Langsdorf, 1939)

Ο θάλαμος του Langsdorf εμφανίζεται σχηματικά στην παρακάτω Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Διαρκώς ενεργός θάλαμος νεφώσεως διάχυσης (βλ. Langsdorf, 1939)

Η κατασκευή συνοπτικά απαρτίζεται από τα εξής μέρη :

A: Χώρος διανομής θερμού ατμού μεθανόλης. **B:** Περιοχή του θαλάμου όπου σχηματίζονται ίχνη. **C:** Δάπεδο θαλάμου. **D:** Τοιχώματα από φύλλα γυαλιού. **E:** Αντλία ψυκτικού υγρού. Το στόμιο εισόδου της συνδέεται με την έξοδο από την αριστερή πλευρά του δαπέδου του

θαλάμου (δεν εμφανίζεται). **F:** Δοχείο παραγωγής θερμού ατμού μεθανόλης. **G:** Θερμαντήρας δοχείου παραγωγής θερμού ατμού μεθανόλης. **H:** Στοιχείο ψύξεως ψυκτικού υγρού ή συμπυκνωτής ψυκτικού υγρού. **K:** Οροφή θαλάμου με οπές για στόμια θερμού ατμού μεθανόλης. **M:** Θερμαντικά στοιχεία για την επιφάνεια K και την οροφή του χώρου A. **N:** Δοχείο διαστολής και αφαίρεσης φυσαλίδων. **P:** Εξωτερικό κατακόρυφο φύλλο γυαλιού. **Q:** Εξωτερικό οριζόντιο φύλλο γυαλιού. **R:** Θέση παρατήρησης από φωτογραφική κάμερα **V:** Δοχείο αποστράγγισης συμπυκνωμάτων και σωλήνας αποστράγγισης. **T:** Σφραγισμένος θάλαμος που περιέχει ξηρό αέρα **U:** Ράβδος στερέωσης που συγκρατεί τον τους θαλάμους B και T σε ενιαία συγκρότηση

Ο θάλαμος διάχυσης αυτός καθαυτός είναι ο όγκος B οριζόμενος ως ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με πλευρικά τοιχώματα από γυαλί. Η οροφή του θαλάμου αποτελείται από μία μεταλλική επιφάνεια K, η οποία έχει πολλές μικρές τρύπες που επικοινωνούν με το χώρο A. Θερμός ατμός μεθανόλης παράγεται από ένα μικρό βραστήρα F και οδηγείται στο χώρο A, όπου αναμιγνύεται με διοξείδιο του άνθρακα και διανέμεται ομοιόμορφα προς το χώρο B μέσω των οπών της επιφάνειας K. Ο χώρος A και η επιφάνεια K διατηρούνται ζεστοί από ηλεκτρικά θερμαντικά στοιχεία M. Το δάπεδο C του θαλάμου νεφώσεως, αποτελείται από δύο φύλλα γυαλιού μεταξύ των οποίων κυκλοφορεί υγρό για ψύξη. Αυτό το υγρό κυκλοφορεί με τη βοήθεια αντλίας E, και ψύχεται περνώντας μέσα από έναν ελικοειδή αγωγό H βυθισμένο σε υγρό που ψύχεται από πάγο ή στερεό διοξείδιο του άνθρακα. Ο θερμός ατμός μεθανόλης που έχει διαχυθεί προς το θάλαμο B, συμπυκνώνεται στο δάπεδο του θαλάμου και αποστραγγίζεται προς κατάλληλο δοχείο S. Το κλειστό δοχείο διαστολής N, διατηρεί την πίεση στο θάλαμο B κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση, προκειμένου να αποφευχθεί το σπάσιμο του γυάλινου δαπέδου C. Το ενεργό ύψος του νέφους ατμών που παράγει ο θάλαμος αυτός είναι περίπου από ~2 έως ~7 cm. Το συνολικό ύψος του θαλάμου B είναι περίπου 15 cm.

Ο θάλαμος Langsdorf είναι ένα ορθογώνιο κιβώτιο. Δεν αποκλείεται ένας κυλινδρικός θάλαμος τύπου διάχυσης, ο οποίος έχει λιγότερες αρθρώσεις (και άρα λιγότερες διαρροές) και μπορεί να αντέχει μεγαλύτερες πιέσεις στο εσωτερικό του.

2.3.3 Λειτουργία θαλάμου Langsdorf

Αρχικά ο αέρας που υπάρχει στο θάλαμο B εκτοπίζεται από διοξείδιο του άνθρακα ενώ ο χώρος A τηρείται πλήρης με αλκοόλη. Τα διάφορα ηλεκτρικά θερμαντικά στοιχεία ενεργοποιούνται και τίθενται περίπου στο διπλάσιο της ισχύος που χρησιμοποιείται στην κανονική λειτουργία του θαλάμου, έως ότου ο θάλαμος φθάσει στη θερμοκρασία

λειτουργίας. Κατά τη διάρκεια της δημιουργίας ροής ατμού, στο θάλαμο σχηματίζεται καθοδική συμπύκνωση με μορφή ομίχλης. Το φαινόμενο παύει να παρατηρείται μέσα σε μια ώρα. Στη συνέχεια το δάπεδο του θαλάμου ψύχεται με το ψυκτικό υγρό σε σταθερή παροχή μέσα από το χώρο T. Στο τέλος της προετοιμασίας του θαλάμου το δάπεδο του θαλάμου καλύπτεται με νέφος ατμών αλκοόλης. Τέλος, ένα ηλεκτρικό πεδίο αρκετών εκατοντάδων Volt μπορεί να εφαρμόζεται μεταξύ της οροφής και του δαπέδου του θαλάμου προκειμένου να ελεγχθεί ο αριθμός των ιόντων που μπορούν να προκαλούν συμπυκνώσεις. Για την οπτική παρατήρηση αρκεί ακόμα και το φως από ένα συμβατικό λαμπτήρα. Καθώς η θερμοκρασία του δαπέδου μειώνεται, παρατηρείται ακριβώς πάνω από το δάπεδο του θαλάμου μια διάχυτη "βροχή" συμπύκνωσης σε μια περιοχή μικρού ύψους, το ύψος της οποίας σταδιακά αυξάνεται. Η βροχή εμφανίζεται για πρώτη φορά στην επιφάνεια του δαπέδου όπου το ψυκτικό υγρό έρχεται για πρώτη φορά σε επαφή με το αντίστοιχο κάτω μέρος του δαπέδου, αλλά μετά από ένα σύντομο χρονικό διάστημα, όταν η ροή ψυκτικού καλύψει όλη την κάτω επιφάνεια του δαπέδου το αποτέλεσμα αυτό γίνεται ομοιόμορφο πάνω από όλο το δάπεδο.

2.3.4 Ίχνη από ιονισμούς λόγω φωτονίων και β σωματιδίων

Όταν η περιοχή της συμπύκνωσης πάρει τη μορφή νέφους με πάχος περίπου 12 mm, η οποία ονομάζεται "ευαίσθητη περιοχή", τότε μέσα στο νέφος παρατηρούνται "ριπές" έντονης συμπύκνωσης. Αυτές οι "ριπές" ερμηνεύονται ως μικρό ακριανό τμήμα από τροχιές ιόντων, προερχομένων από αλληλεπιδράσεις φωτονίων ή β σωματιδίων με το αέριο του θαλάμου, που δημιουργούνται επάνω από την ευαίσθητη περιοχή και διαχέονται προς αυτήν. Η λανθάνουσα θερμότητα που απελευθερώνεται λόγω της συμπύκνωσης, δημιουργεί εντοπισμένη αύξηση της θερμοκρασίας του αερίου. Ως αποτέλεσμα παρατηρείται συναγωγή στο αέριο του θαλάμου και τοπική καταστροφή του νέφους. Όταν η κλίση μείωσης θερμοκρασίας έχει σταθεροποιηθεί σε όλο το θάλαμο, δεν παρατηρούνται πλέον έντονα τέτοια φαινόμενα. Περίπου δεκαπέντε λεπτά έως μισή ώρα μετά την εφαρμογή της ισχυρής ψύξης και χωρίς την παρουσία άλλων γνωστών πηγών ακτινοβολίας, παρατηρούνται στο θάλαμο ίχνη που σχετίζονται με τη κοσμική ακτινοβολία και το φυσιολογικό υπόστρωμα φωτονίων (ακτινοβολία του περιβάλλοντος), σε μια ευαίσθητη περιοχή με ύψος περίπου δύο ίντσες πάνω από το δάπεδο του θαλάμου. Ένα τυπικό τέτοιο ίχνος χρειάζεται ένα έως τρία δευτερόλεπτα για να πέσει στο δάπεδο του θαλάμου. Καθώς η λειτουργία του θαλάμου συνεχίζεται η ευαίσθητη στα ιόντα περιοχή επεκτείνεται σταδιακά προς τα επάνω μέχρι να φτάσει σε ένα ανώτατο ύψος που μπορεί να είναι έως και 10 cm από το δάπεδο του θαλάμου. Ωστόσο, τα ίχνη που παρατηρούνται σε μεγάλο ύψος δεν είναι αρκετά οξεία ώστε να

διακρίνονται καλά και δεν είναι πολύ ικανοποιητικά για λεπτομερή μελέτη. Με το θάλαμο σε αυτήν την κατάσταση, αν αφαιρεθεί το ηλεκτρικό πεδίο παρατηρείται μια αύξηση στον αριθμό ορατών ιχνών, για μια σύντομη περίοδο, αλλά μετά από λίγο, φαίνονται λιγότερα ίχνη σε σχέση με όταν λειτουργούσε το πεδίο. Φαίνεται ότι ο θάλαμος έχει φθάσει τότε σε μια κατάσταση όπου ο διαλυμένος ατμός είναι μόλις επαρκής για να επιτρέπεται η συμπύκνωση με πυρήνες τα ιόντα. Ως εκ τούτου ο χρόνος που ένα ιόν παραμένει στον ατμό προτού να σχηματίσει μια μικρή ορατή συμπύκνωση είναι αρκετός. Κατά συνέπεια το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να μετακινήσει τα ιόντα αρκετά μακριά από την ευαίσθητη περιοχή, μέχρι που να μην διαμορφώνουν κανένα ίχνος. Μετά την αφαίρεση του πεδίου, τα ιόντα παραμένουν περισσότερο χρόνο σε μια μικρότερη περιοχή και μπορούν να σχηματίζουν διάχυτα αναγνωρίσιμα αλλά "συγκεχυμένα" ίχνη. Επιπλέον, χωρίς το ηλεκτρικό πεδίο αυξάνεται το συνολικά διαθέσιμο πλήθος των ιόντων, έτσι ώστε οι συμπυκνώσεις που προκαλούν να καταναλώνουν τόσο ατμό που να μην περισσεύει πλέον άλλος για να σχηματίζονται πλέον διακριτά ίχνη. Είναι επομένως πιθανό ότι τα καλύτερα ίχνη σχηματίζονται κατά την προηγούμενη μεταβατική περίοδο λειτουργίας, όπου η ευαίσθητη περιοχή είναι μικρότερου ύψους διότι εκείνη τη στιγμή ο διαθέσιμος ατμός είναι στην πραγματικότητα πολύ περισσότερος ανά μονάδα όγκου, από ό,τι στην επόμενη σταθερότερη κατάσταση.

Μία πηγή ραδίου $1 \mu\text{g}$ ($= 10^{-6} \text{ Curie} = 3.7 \times 10^4 \text{ Bq}$), που τοποθετείται κοντά στο θάλαμο αυξάνει απότομα, τόσο τον αριθμό των ιχνών όσο και τη διάχυτη "βροχή". Μία πηγή ραδίου 1 mg ($= 10^{-3} \text{ Curie} = 3.7 \times 10^7 \text{ Bq}$), που τοποθετείται 6 μέτρα μακριά από τη συσκευή παράγει έναν αξιόλογο αριθμό ιχνών. Κοντά στη συσκευή, δημιουργεί αρχικά ένα πολύ ισχυρό "ντους" (shower) διάχυτης συμπύκνωσης, το οποίο σύντομα μειώνεται σε ένταση, έτσι ώστε η ποσότητα ισορροπίας της συμπύκνωσης να μην είναι εντυπωσιακά μεγαλύτερη από όταν δεν υπάρχει πηγή ιόντων κοντά. Αυτό εξηγείται διότι η παρουσία υπερβολικού αριθμού ιόντων, οδηγεί σε πολλές συμπυκνώσεις που καταστρέφουν τον ατμό που είναι διαθέσιμος προς συμπύκνωση. Το πλήθος των ιόντων που προσβάλλει τον ατμό μπορεί να ελεγχθεί κυρίως με τη χρήση του ηλεκτρικού πεδίου. Εάν η ισχυρή πηγή αφαιρεθεί, χρειάζονται αρκετά λεπτά για να ξαναδημιουργηθεί αρκετός ατμός σε μία περιοχή όπου παρατηρήθηκαν πολλά ίχνη. Το πρακτικό συμπέρασμα από τις παραπάνω παρατηρήσεις είναι ότι ο θάλαμος μπορεί γενικά να αναγνωρίσει πεδία ιόντων με ροή στην τάξη μεγέθους της κοσμικής ακτινοβολίας και της ακτινοβολίας του περιβάλλοντος. Ροές ιόντων μεγαλύτερης τάξης δεν συνδέονται αναγκαστικά με πολύ περισσότερα ίχνη, διότι τα πολλά ιόντα προκαλούν τόσες συμπυκνώσεις που εξουδετερώνουν το διαθέσιμο νέφος.

Οι συλλογισμοί της προηγούμενης παραγράφου αποδεικνύονται όπως στη συνέχεια. Έστω ότι ο ατμός του θαλάμου προσβάλλεται από πεδίο ιόντων σταθερής ροής για περίοδο αρκετών λεπτών. Ο νόμος διατήρησης μάζας διατυπώνεται ως εξής: Η μέση μάζα των σταγόνων στο δάπεδο του θαλάμου δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τη μάζα του ατμού, που διαχέεται μέσα στο θάλαμο από την οροφή του. Η μάζα μιας σταγόνας πυκνότητας ρ είναι :

$$m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho \quad (2.5)$$

όπου a η ακτίνα σε cm και m σε g

Η ακτίνα της σταγόνας συνδέεται με την ταχύτητα πτώσης της v , με τη σχέση:

$$v = 2g \frac{a^2}{9} \eta \rho \quad (2.6)$$

όπου

η το ιξώδες του αερίου σε cm s/g,

g η επιτάχυνση της βαρύτητας, και

v σε cm/s

Για το συγκεκριμένο σύστημα που εξέτασε ο Langsdorf η μάζα μιας σταγόνας που πέφτει είναι

$$m = 3.6 \times 10^{-9} v^{\frac{3}{2}} \quad (2.7)$$

Στη συνέχεια, ας θεωρηθεί μια διατομή του θαλάμου εμβαδού 1 cm^2 . Αν από τη διατομή αυτή περνούν σταγόνες ατμού με ροή της τάξης των 10^{-5} g/s , η συνολική ροή σταγόνων δεν μπορεί να υπερβαίνει κατά μέσο όρο το άνω όριο

$$\frac{10^{-5}}{3.6 \cdot 10^{-9} \cdot v^{\frac{3}{2}}} \text{ [σταγόνες ανά δευτερόλεπτο]}$$

Αν είναι I ο μέσος αριθμός των ιόντων, που απελευθερώνονται ανά κυβικό εκατοστό του θαλάμου ανά δευτερόλεπτο τότε σε ένα θάλαμο ύψους 15 cm, και αν κάθε ιόν σχηματίζει μια σταγόνα, τότε πρέπει να ισχύει

$$15I \leq \frac{10^{-5}}{3.6 \cdot 10^{-9} \cdot v^{\frac{3}{2}}} \quad \text{ή} \quad I \leq 185 \cdot v^{-\frac{3}{2}} \quad (2.8)$$

Αν πρόκειται για κοσμική ακτινοβολία και υπόβαθρο φυσικών ακτινοβολιών και ο θάλαμος δεν είναι θωρακισμένος τότε ο I θα είναι περίπου 30. Με βάση αυτό προκύπτει ότι η ταχύτητα πτώσης των σταγόνων είναι

$$v \leq 3.4 \text{ cm/s} \quad (2.9)$$

Στην πραγματικότητα, η ταχύτητα v είναι πάντα περίπου τόση και δεν είναι ποτέ πολύ μικρότερη. Κατά συνέπεια επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι το ιονικό φορτίο - όριο, το οποίο μπορεί να αναγνωρίσει ο θάλαμος, είναι της τάξης του φυσιολογικού ιονισμού από κοσμική ακτινοβολία και υπόστρωμα. Τα συμπληρωματικά συμπεράσματα είναι:

- Είναι χρήσιμη η θωράκιση του θαλάμου από την φωτονιακή ακτινοβολία του υποστρώματος διότι με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η ροή ιόντων στο θάλαμο από 50% μέχρι και 90%, κάνοντας τον ατμό του θαλάμου διαθέσιμο για την ανίχνευση ιόντων από φωτονιακές πηγές του χρήστη.
- Θα πρέπει να χρησιμοποιείται ο κατάλληλος συνδυασμός ατμού - αερίου, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται καλή διάχυση του ατμού στο αέριο ώστε να δημιουργείται το νέφος και καλή θερμική αγωγιμότητα από τους ατμούς προς το αέριο ώστε να μην καταστρέφεται τοπικά το νέφος από τη λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης. Υπενθυμίζεται ότι ο Langsdorf επέλεξε για τους ατμούς μεθανόλη και για το αέριο διοξείδιο του άνθρακα.

2.3.5 Ίχνη από -α σωματίδια

Το φυσιολογικό υπόστρωμα -α σωματιδίων που εκπέμπονται από τα τοιχώματα του θαλάμου (κυρίως λόγω μόλυνσής τους μετά από χρήση πηγών -α σωματιδίων), είναι αμελητέο. Επιπλέον στο υπόστρωμα αυτό δεν συμβάλλουν -α σωματίδια παραγόμενα εκτός του θαλάμου, επειδή δεν μπορούν να διαπεράσουν τα τοιχώματά του και να αλληλεπιδράσουν με τον ατμό. Τέλος -α σωματίδια οφειλόμενα στη διάσπαση του ραδονίου που τυχόν βρίσκεται στο εγκλωβισμένο στο θάλαμο, είναι επίσης αμελητέα.

Τα καλύτερα ίχνη που προέρχονται από -α σωματίδια (ακριβώς όπως τα καλύτερα ίχνη από -β σωματίδια και φωτόνια), εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της αρχικής παροδικής περιόδου ψύξης, όταν το νέφος είναι συγκεντρωμένο και πυκνό σε περιορισμένο όγκο κοντά στο δάπεδο και έχει ύψος μέχρι περίπου 5 cm.

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις κατά τις οποίες τα ίχνη συμπύκνωσης, τα οφειλόμενα σε -α σωματίδια, δεν έχουν μορφή ευθείας τροχιάς αλλά μορφή "κουρτίνας" συμπυκνώσεως. Μια εξήγηση για αυτή τη μορφή είναι ότι δεν υπάρχει επαρκής ατμός κοντά στα ιόντα που

δημιουργεί το σωματίδιο αλληλεπιδρώντας με το θάλαμο, για να σχηματιστεί ικανός αριθμός από σταγονίδια συμπύκνωσης και να αποτυπωθεί η τροχιά. Τα πρώτα λίγα σταγονίδια που σχηματίζονται από τα πρώτα λίγα ιόντα πέφτουν προς το δάπεδο δημιουργώντας μια "βροχή" που εξελίσσεται σε ένα επίπεδο (ή "κουρτίνα"), το οποίο εκτείνεται προς τον κατώτερο πυκνότερο ατμό. Η "κουρτίνα" αυτή τροφοδοτείται διαρκώς και από τα σταγονίδια από τα υπόλοιπα επόμενα ιόντα, τα οποία συμπυκνώνουν ατμό σταδιακά. Ο ατμός αυτός προέρχεται από διάχυση από τα πυκνότερα κατώτερα στρώματα προς την περιοχή στην οποία παρατηρείται αραίωση ατμού λόγω συμπυκνώσεων. Αν στο θάλαμο υπάρχει και ηλεκτρικό πεδίο, η "κουρτίνα" φαίνεται να είναι κάπως διαφορετική. Σε αυτή την περίπτωση τα ιόντα κινούνται λόγω και του ηλεκτρικού πεδίου με μεγαλύτερες ταχύτητες από ότι πέφτουν τα σταγονίδια, με αποτέλεσμα η "κουρτίνα" να ακολουθεί τα ιόντα και όχι να προέρχεται από αυτά. Η παραγόμενη συμπύκνωση σχηματίζει σύντομα ένα λεπτό "φύλλο" μεταξύ της αρχικής θέσης του ίχνους και του δαπέδου του θαλάμου. Το φαινόμενο "κουρτίνας" αποφεύγεται αν το χρησιμοποιούμενο προς ανίχνευση νέφος είναι αυτό της αρχικής παροδικής περιόδου ψύξης.

2.3.6 Ίχνη από άλλα φαινόμενα

Οι θάλαμοι τύπου διάχυσης είναι κατάλληλοι και για την ανίχνευση άλλων φαινομένων που συνδέονται επίσης με ιόντα που δεν παράγονται από ακτινοβολίες ή με σωματίδια που λειτουργούν ως πυρήνες συμπυκνώσεως. Χαρακτηριστικά αναφέρονται τα ιόντα που προέρχονται από ηλεκτρικές εκκενώσεις και τα σωματίδια, όπως η σκόνη, ο καπνός του τσιγάρου και άλλα, τα οποία ευρισκόμενα στον ατμοσφαιρικό αέρα δυνατόν να προκαλούν ορατά ίχνη, όντας τα ίδια σχεδόν αόρατα στο ανθρώπινο μάτι.

2.3.7 Προσεγγιστική ανάλυση θαλάμου

Ακολουθεί μία ανάλυση της κατανομής θερμοκρασίας και της πυκνότητας του ατμού όπως μπορούν να αναμένονται μέσα σε ένα θάλαμο νεφώσεως τύπου διάχυσης. Οι ποσοτικοί υπολογισμοί μπορούν να απλοποιηθούν με ορισμένες εύλογες υποθέσεις:

- Οι οριακές συνθήκες που δημιουργούν τα πλευρικά τοιχώματα θα αμεληθούν, ώστε η ανάλυση για τη διάχυση και τη μεταφορά θερμότητας, να γίνει προσεγγιστικά σε μία διάσταση κατά το ύψος του θαλάμου. Οι εξισώσεις που θα προκύψουν θεωρούνται ότι περιγράφουν την κατάσταση μεταξύ του δαπέδου και της οροφής του θαλάμου αν το πλάτος και το μήκος του θεωρηθούν άπειρα.
- Το μίγμα ατμού - αερίου θεωρείται τέλειο αέριο

- Η ανάλυση θα γίνει για τη μόνιμη κατάσταση (χωρίς εξάρτηση από το χρόνο)
- Το ύψος μετρείται από το δάπεδο του θαλάμου (όπου $x = 0$)
- Αμελείται η συμπύκνωση του ατμού κατά το ύψος x
- Η απορρόφηση και η εκπομπή ακτινοβολίας από τον ατμό αμελούνται

Η θερμότητα μεταφέρεται στο μίγμα αερίου - ατμού του θαλάμου με αγωγή. Ο όρος αγωγής είναι:

$$-\lambda \frac{dT}{dx}$$

όπου:

λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε $W/(cm K)$

T η θερμοκρασία σε μονάδες K , και

x η θέση ύψους

Στο θάλαμο προσδίδεται θερμότητα με τον ατμό (v) μεθανόλης που εισάγεται στην οροφή του:

$$m'_v|_{x=H} \times h_s$$

όπου

$m'_v|_{x=H}$ η ροή μάζας ατμού μεθανόλης σε $g/(cm^2 s)$ από την οροφή του θαλάμου, και

h_s η ενθαλπία του ατμού μεθανόλης σε J/g

Επομένως η διαφορική εξίσωση του ισοζυγίου ενέργειας στην μόνιμη κατάσταση μπορεί να γράφεται:

$$q' = m'_v|_{x=H} h_g - \lambda \frac{dT}{dx} = m'_v|_{x=H} c_p T - \lambda_0 (1 + bT) \frac{dT}{dx} \quad (2.10)$$

όπου:

η ενθαλπία h_v του ατμού αντικαταστάθηκε από την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του ατμού c_p επί τη θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο θάλαμο T , για τη μεθανόλη γίνεται δεκτό ότι το c_p είναι σταθερό και ίσο με $1.04 J/(kg K)$, και

ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ του μίγματος αερίου - ατμού μπορεί να γράφεται ως μία γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας με τη μορφή

$$\lambda = \lambda_0 (a + bT), \quad a = 1, \quad b = 0.0048 \text{ K}^{-1}$$

$$\lambda_0 \approx 12 \times 10^{-5} \text{ W/(cm K)}$$

και

q' η ροή θερμότητας σε $\text{J}/(\text{cm}^2 \text{ s})$

Για την επίλυση μπορούν να χρησιμοποιούνται οι αρχικές συνθήκες:

$$\text{για } x = 0, T_0 = 233 \text{ K και για } x = H = 40 \text{ cm}, T_1 = 343 \text{ K}$$

όπου H το μέγιστο ύψος του θαλάμου.

Η πίεση του θαλάμου θεωρείται σταθερή και ίση με $p_0 = 1 \text{ atm}$.

Η ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης (2.10) δίνει:

$$\frac{x}{H} = \frac{b(T - T_0) + [1 + rb(T_1 - T_0)] \ln \left[1 - \frac{T - T_0}{r(T_1 - T_0)} \right]}{b(T_1 - T_0) + [1 + rb(T_1 - T_0)] \ln \left(1 - \frac{1}{r} \right)} \quad (2.11)$$

όπου

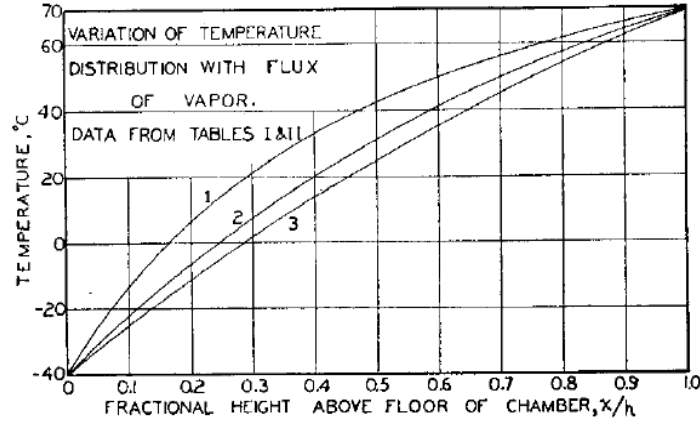
r είναι μια παράμετρος διευκόλυνσης που ορίζεται ως

$$r = \frac{q}{m'_v|_{x=H} c_{ps} (T_1 - T_0)}$$

Με τη χρήση του r , η ποσότητα $m'_g|_{x=H}$ που απαιτείται για την διατήρηση του ισοζυγίου, μπορεί να καθορίζεται από τη σχέση:

$$m'_v|_{x=H} c_p \frac{H}{\lambda_0} = b(T_1 - T_0) + [1 + rb(T_1 - T_0)] \ln \left(1 - \frac{1}{r} \right) \quad (2.12)$$

Στην Εικόνα 2.11 απεικονίζεται ένα διάγραμμα, που δείχνει την κατανομή θερμοκρασίας στο θάλαμο νεφώσεως, όπως καθορίζεται από την εξίσωση (2.11).



Εικόνα 2.8: Κατανομή θερμοκρασίας κατά το ύψος για τρεις τιμές της m'_v (βλ. Langsdorf, 1939)

1: 6.86×10^{-6} , **2:** 2.56×10^{-6} , και **3:** 1.05×10^{-6} g/(cm⁻² s)

Η κατανομή του ατμού υπολογίζεται με βάση την παραδοχή ότι ο ατμός μεθανόλης είναι τέλειο αέριο και οι εξισώσεις διάχυσης του ατμού κάτω από ισοθερμοκρασιακές συνθήκες, μπορούν να εφαρμόζονται κατά προσέγγιση και σε ένα σύστημα που περιλαμβάνει κλίση θερμοκρασίας.

Για τον ατμό μεθανόλης ως τέλειο αέριο ισχύει για τη μάζα της $m_v(x)$ σε ένα ύψος x του θαλάμου

$$p_v(x) v_v(x) = \frac{m_v(x)}{MB_v} RT(x) \quad (2.13)$$

Επομένως προκύπτει ότι για την πυκνότητά της $\rho_v(x)$ σε ένα ύψος x του θαλάμου

$$p_v(x) MB_v = \frac{m_v(x)}{v_v(x)} RT(x) = \rho_v(x) RT(x) \Rightarrow \rho_v(x) = \frac{p_v(x) MB_v}{RT(x)} \quad (2.14)$$

Για μονοδιάστατη διάχυση σε ισοθερμοκρασιακές συνθήκες ο Kuusinen (1935) δίνει την εξίσωση συνέχειας. Είναι για τον ατμό της μεθανόλης:

$$m'_v(x) = w(x) \rho_v(x) - k \left(\frac{MB_v}{RT} \right) \frac{\partial p_v(x)}{\partial x} \quad (2.15)$$

ή ισοδύναμα

$$m'_v(x) = w(x) \rho_v(x) - k \frac{\partial \left(\frac{MB_v}{RT} p_v(x) \right)}{\partial x} \quad (2.16)$$

όπου

$w(x)$ η ταχύτητα ροής του μίγματος αερίου - ατμού σε cm/s

k ο συντελεστής διάχυσης μάζας σε cm^2/s , και

$p_v(x) = p_0 - p_g(x)$, με $p_g(x)$ την πίεση του αερίου

Για μονοδιάστατη διάχυση σε μη ισοθερμοκρασιακές συνθήκες αυτή η εξίσωση συνέχειας γράφεται:

$$m'_v(x) = w(x)\rho_v(x) - k \frac{\partial \left[\frac{MB_v}{RT(x)} p_v(x) \right]}{\partial x} \quad (2.17)$$

Δηλαδή με τη βοήθεια της εξίσωσης (2.14)

$$m'_v(x) = w(x)\rho_v(x) - k \frac{\partial \rho_v(x)}{\partial x} \quad (2.18)$$

Κατά απολύτως όμοιο τρόπο είναι για το αέριο (g) διοξείδιο του άνθρακα (θεωρούμενου και αυτού ως τέλειο αέριο) που διαχέεται σε μη ισοθερμοκρασιακές συνθήκες:

$$m'_g(x) = w(x)\rho_g(x) - k \frac{\partial \rho_g(x)}{\partial x} \quad (2.19)$$

Ισχύει επίσης

$$w(x) = m'_v(x)v_v(x) + m'_g(x)v_g(x) \quad (2.20)$$

όπου

$v_v(x)$ ο μερικός όγκος του ατμού ως τέλειο αέριο, ανά g μίγματος, και

$v_g(x)$ ο μερικός όγκος του αερίου ως τέλειο αέριο, ανά g μίγματος

με

$$p_v v_v(x) = \frac{RT(x)}{MB_v} \quad (2.21)$$

και

$$p_g v_g(x) = \frac{RT(x)}{MB_g} \quad (2.22)$$

Αν γίνει δεκτό ότι ο συντελεστής διάχυσης υπολογίζεται ως

$$k = (k_0 / p_0)(T / T_0)^{1+a} \quad \text{όπου } k_0 = 0.0641 \text{ cm}^2/\text{s}, p_0 = 1 \text{ atm}$$

Αντικαθιστώντας η εξίσωση (2.19) επαναδιατυπώνεται ως εξής:

$$\frac{m'_v(x)RT_0}{MB_v k_0} p_g(x) = \left[\frac{1+T(x)-T_0}{T_0} \right]^a \frac{dp_g(x)}{dx} \quad (2.23)$$

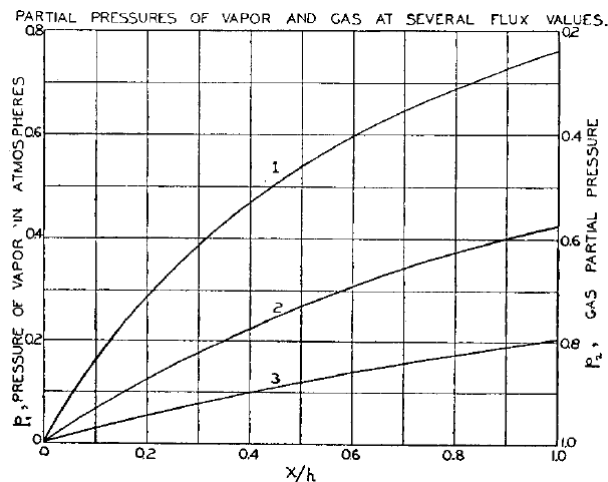
Δεδομένου ότι η εξίσωση (2.12) δίνει το x ως συνάρτηση της T , η εξίσωση (2.23) μπορεί να αναδιατυπωθεί ως:

$$\frac{dp_g(T)}{p_g(T)} = \frac{m'_v(T)RT_0 K_0 [1+b(T-T_0)]}{MB_v k_0 \left[1 + \frac{T-T_0}{T_0}\right]^a [m'_v(T)c_p(T-T_0) - q]} dT \quad (2.24)$$

Αφού $a = 1$ όπως ισχύει για τη μεθανόλη και το διοξείδιο του άνθρακα, το ολοκλήρωμα της (2.24) είναι:

$$\ln \frac{p_g(T-T_0)}{p_g(0)} = \frac{T_0}{T_0 + r(T_1 - T_0)} \cdot \frac{RT_0 K_0}{MB_s k_0 c_p} \left\{ [1 + br(T_1 - T_0)] \ln \left[\frac{1 - (T - T_0)}{r(T_1 - T_0)} \right] - (1 - bT_0) \ln \left[\frac{1 + (T - T_0)}{T_0} \right] \right\} \quad (2.25)$$

Η Εικόνα 2.9 είναι ένα διάγραμμα, που δείχνει την κατανομή της πίεσης αερίου και ατμού με το ύψος, για τρεις τιμές ροής ατμών, όπως καθορίζεται από την εξίσωση (2.25)



Εικόνα 2.9: Κατανομή μερικών πιέσεων κατά το ύψος για τρεις τιμές της m'_v (βλ. Langsdorf, 1939)

1: 6.86×10^{-6} , **2:** 2.56×10^{-6} , και **3:** 1.05×10^{-6} g/(cm² s)

Με βάση την εξίσωση (2.25) μπορεί να καθορισθεί αν το μίγμα αερίου - ατμού είναι υπέρκορο σε ατμό, έχει δηλαδή περίσσεια ατμού προς συμπύκνωση. Ο βαθμός υπέρκορεσμού S καθορίζεται από το λόγο της μερικής πίεσης των ατμών προς την αντίστοιχη πίεση κορεσμού τους:

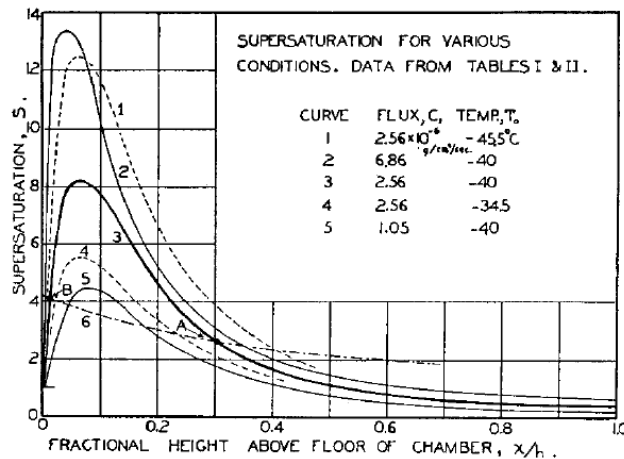
$$S = \frac{p_v}{p_{vs}} = \frac{p_0 - p_g(T)}{p_{vs}} = \frac{p_0 - \left[\frac{p_g(T)}{p_g(T=T_0)} \right] [p_0 - p_v(T=T_0)]}{p_{vs}} \quad (2.26)$$

Εφόσον η πίεση $p_v(T=T_0)$ είναι μικρή σε σύγκριση με την p_0 , ισχύει η προσέγγιση

$$S = \frac{p_0 \left[1 - \frac{p_g}{p_g(T=T_0)} \right]}{p_{vs}} \quad (2.27)$$

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλες τις θερμοκρασίες εκτός από πολύ κοντά στο $T=T_0$. Φαίνεται ότι για μια δεδομένη παροχή ατμού, ο βαθμός υπέρκορεσμού είναι ανάλογος με την πίεση λειτουργίας. Το ύψος του θαλάμου νεφώσεως, δεν εμφανίζεται ρητά στην εξίσωση (2.25) που αφορά στην πίεση, ούτε στο δεξί μέρος της εξίσωσης (2.11) που αφορά στην κατανομή της θερμοκρασίας κατά x/H . Επομένως, εάν η παράμετρος r παραμένει σταθερή, η μορφή της καμπύλης για τον συντελεστή υπέρκορεσμού παραμένει αμετάβλητη όταν αλλάζει το H . Επιπλέον, η εξίσωση (2.12) δείχνει ότι η ροή μάζας του ατμού $m'_{v/x=H}$ και κατά συνέπεια η ροή της θερμότητας q , μειώνεται με την αύξηση του H . Αυτή η παρατήρηση είναι σημαντική επειδή το ποσό ατμού που αφαιρείται λόγω συμπύκνωσης, για να διαμορφώσει τις σταγόνες, χρειάζεται να αυξηθεί αναλογικά, στην περίπτωση που ο θάλαμος γίνεται μεγαλύτερου ύψους. Αυτοί οι υπολογισμοί από την άλλη δείχνουν ότι η αναγκαία στην περίπτωση του θαλάμου μεγαλύτερου ύψους ροή μάζας ατμού μπορεί να είναι μικρότερη από άλλους κοντούτερους θαλάμους και παρόλα αυτά ο θάλαμος να λειτουργεί ικανοποιητικά.

Η Εικόνα 2.10 δείχνει τυπικές καμπύλες που συσχετίζουν τα S και x/H , με τη βοήθεια της εξίσωσης (2.27). Η επίδραση στο S της μεταβολής της ροής ατμού απεικονίζεται με τις καμπύλες "2", "3" και "5". Η επίδραση μιας μικρής αλλαγής στη θερμοκρασία δαπέδου T_0 , απεικονίζεται από τις καμπύλες "1", "3", και "4". Για αυτή τη μικρή αλλαγή του T_0 , διατηρώντας σταθερή την T_1 της οροφής, οι φυσικές σταθερές που εισέρχονται στις εξισώσεις (2.11) και (2.25) δεν μεταβάλλονται στην πράξη.



Εικόνα 2.10: Τυπικές καμπύλες συντελεστή υπερκορεσμού κατά το ύψος για διάφορες τιμές της m'_v και διάφορες τιμές της T_0 (βλ. Langsdorf, 1939)

Η διακεκομμένη καμπύλη "6", στην Εικόνα 2.10, αντιπροσωπεύει μια πρόχειρη εκτίμηση του ελάχιστου βαθμού υπερκορεσμού S_{cr} , ο οποίος θα επιτρέψει συμπυκνώσεις λόγω πυρήνων από ιόντα στον ατμό μεθανόλης. Η καμπύλη "6" έχει χαραχθεί για τα δεδομένα της ροής μάζας της καμπύλης "3". Θεωρώντας την καμπύλη "6" σωστή, τα σημεία τομής της με την καμπύλη "3", τα "A" και "E", αντιπροσωπεύουν τα όρια της περιοχής στην οποία πρέπει να παράγονται ίχνη για τις συνθήκες που αντιστοιχούν στην καμπύλη "3". Για τις άλλες καμπύλες "1" έως και "5", θα υπάρχουν αντίστοιχες καμπύλες S_{cr} , σε διαφορετικές αλλά κοντινές θέσεις με αυτήν της καμπύλης "6". Προφανώς, εάν ο βαθμός υπερκορεσμού μειωθεί, η ευαίσθητη περιοχή του θαλάμου, τώρα χονδρικά οριζόμενη μεταξύ του ύψους που αντιστοιχεί στο σημείο "E" και του ύψους που αντιστοιχεί στο σημείο "A", θα γίνει στενότερη και τελικά θα εξαφανιστεί εντελώς. Προκύπτει επομένως το συμπέρασμα ότι η απαραίτητη ροή μάζας ατμού είναι της τάξης των 10^{-6} έως 10^{-5} g/(cm² s). Επιπλέον προκύπτει ότι η λειτουργία του θαλάμου είναι πολύ ευαίσθητη στη θερμοκρασία. Μια αλλαγή 5 έως 10 βαθμών μπορεί εύκολα να κάνει τη διαφορά μεταξύ της λειτουργίας και της μη λειτουργίας ενός θαλάμου.

2.4 Αρχές σχεδιασμού θαλάμου νεφώσεως τύπου διάχυσης

Προκειμένου να επιτευχθεί η κατασκευή ενός θαλάμου νεφώσεως τύπου διάχυσης που να λειτουργεί ικανοποιητικά πρέπει να διαχωριστούν και να απογραφούν οι παράγοντες που επηρεάζουν ώστε να γίνουν ορθές κατασκευαστικές επιλογές.

- Η επιλογή του είδους του θερμού ατμού και του αερίου διάχυσης περιορίζεται από την ανάγκη, ότι η πυκνότητα του θερμού ατμού δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα αερίου ώστε το παραγόμενο νέφος να παρουσιάζει σταθερότητα και να μην

καταπίπτει. Για παράδειγμα πειράματα έχουν δείξει ότι η μεθανόλη που διαχέεται σε άζωτο δεν είναι κατάλληλος συνδυασμός. Την εποχή που ο Langsdorf δημοσίευσε την έρευνά του ως ικανοποιητικός συνδυασμός θεωρούνταν ο θερμός ατμός μεθανόλης ή ο θερμός ατμός αιθανόλης (με 5% νερό) διαχεόμενος σε διοξείδιο του άνθρακα, αρκεί να εξασφαλίζεται κατάλληλα έντονη ψύξη στο δάπεδο του θαλάμου. Θερμός ατμός από πυκνότερα από τη μεθανόλη οργανικά υλικά διαχεόμενος προς οργανικά αέρια πυκνότερα από το διοξείδιο του άνθρακα παράγουν νέφη που διατηρούνται χωρίς πολύ έντονη ψύξη. Όμως σε τέτοιους συνδυασμούς η διάχυση του θερμού ατμού στο αέριο δεν είναι όσο γρήγορη χρειάζεται.

- Η ορατότητα στο εσωτερικό του θαλάμου νεφώσεως πρέπει να είναι τέτοια ώστε, να μπορεί κανείς να παρατηρεί και να φωτογραφίζει τι συμβαίνει μέσα στο νέφος του θερμού ατμού. Τα ίχνη συμπύκνωσης μπορούν να παρατηρηθούν εύκολα μέσω των διαφανών γυάλινων πλευρών του θαλάμου, αρκεί να δημιουργούνται στον όγκο που βρίσκεται μεταξύ του οργάνου του παρατηρητή και μιας απέναντι ευρισκόμενης κατάλληλη πηγή φωτός. Για να αυξηθεί ο όγκος αυτός θα πρέπει το ευαίσθητο ύψος του νέφους να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερο. Επιπλέον θα πρέπει και το ευαίσθητο πλάτος του νέφους να μην είναι ακατάλληλα μικρό. Το πλάτος του νέφους περιορίζεται συνήθως από τα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου. Αν η απόσταση των πλευρικών τοιχωμάτων μεταξύ τους είναι μικρή τότε η αλληλεπίδραση ακτινοβολίας μεγάλης εμβέλειας με την ύλη πιθανότατα θα γίνει εκτός του θαλάμου. Ακόμα, η φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιείται θα πρέπει να μπορεί να εστιάζει μέσα στον ευαίσθητο χώρο του νέφους στο θάλαμο και όχι αλλού, μακρύτερα ή κοντύτερα. Το δάπεδο του θαλάμου πρέπει συγχρόνως να ψύχεται και να αποστραγγίζεται από συμπυκνώματα και ταυτόχρονα να μην δημιουργεί πάγο που εμποδίζει την ορατότητα. Ανάλογα με την τεχνολογική διαρρύθμιση του θαλάμου, τα ίχνη συμπύκνωσης μπορούν να παρατηρηθούν και από διαφανή οροφή.
- Η πηγή φωτός. Σήμερα (2020) υπάρχουν πολλές και πολύ ικανοποιητικές πηγές φωτός για να χρησιμοποιούνται σε τέτοιους θαλάμους. Αναφέρονται χαρακτηριστικά: φως από βιντεοπροβολέα, φως από προβολέα φωτογραφικών διαφανειών, φωτισμός LED κλπ. Εάν χρειάζεται φωτισμός υψηλής φωτεινότητας στο θάλαμο για σημαντικό χρονικό διάστημα, πρέπει να λαμβάνονται προφυλάξεις για τη διατήρηση της σταθερής λειτουργίας του θαλάμου. Ανάλογα με την πηγή από την οποία προέρχεται το φως, είναι δυνατόν να εισέρχεται στο θάλαμο και υπέρυθη ακτινοβολία (δηλ. θερμότητα) που τελικά

παρεμβαίνει στη λειτουργία του θαλάμου. Σε τέτοια περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα φίλτρο υπερίθρων. Ένα διάλυμα χλωριούχου χαλκού (γαλαζόπετρας) μπορεί να είναι το κατάλληλο. Ομοίως είναι δυνατόν να εισέρχεται στο θάλαμο και ιώδης ή υπεριώδης ακτινοβολία, δηλαδή αόρατα φωτόνια με ενέργειες κοντά σε εκείνα που έχουν ιοντίζουσες ιδιότητες. Ως αποτέλεσμα τα φωτόνια αυτά είναι δυνατό να παράγουν ίχνη συμπύκνωσης έως και φαινόμενα "βροχής" σταγονιδίων. Για τον περιορισμό και αυτού του φαινομένου αρκούν φίλτρα ιώδους και υπεριώδους ακτινοβολίας.

- Η μέθοδος παραγωγής και διανομής θερμού ατμού παίζει σημαντικό ρόλο. Φαίνεται ότι γενικά η μέθοδος του θαλάμου Langsdorf είναι πολύ ικανοποιητική για το σκοπό αυτό, αν και δύσκολα υλοποιήσιμη σε απλούστερους θαλάμους. Η ισχύς των θερμαντικών στοιχείων, αν χρειάζονται, πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην υπάρχει υπερθέρμανση του ατμού. Στο θάλαμο Langsdorf η ισχύς των θερμαντικών στοιχείων στην επιφάνεια K είναι 70 Watt, ενώ η ισχύς των θερμαντικών στοιχείων στο χώρο A είναι 25 Watt. Σε κάθε περίπτωση είναι δυνατόν να υπάρξουν πυρήνες συμπύκνωσης με τους οποίους θα δημιουργηθούν φαινόμενα "βροχής".
- Ο σχεδιασμός του δαπέδου του θαλάμου και το σύστημα ψύξης μπορεί να ποικίλει σε πολυπλοκότητα. Οι θάλαμοι τύπου διάχυσης μπορούν να χτιστούν με απλό μεταλλικό δάπεδο. Παρόλα αυτά, ο Langsdorf θεώρησε χρήσιμο ένα δάπεδο διπλού τοιχώματος από φύλλα γυαλιού. Στο κενό μεταξύ των φύλλων κυκλοφορεί με κατάλληλο τρόπο καθαρό υγρό, όπως η μεθανόλη ή η ακετόνη, σε θερμοκρασίες από $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Όπως και να έχει σε όλο το δάπεδο θα πρέπει να αναπτύσσεται ομογενώς η απαραίτητη χαμηλή θερμοκρασία.
- Η αποστράγγιση του δαπέδου από συμπυκνώματα ατμού είναι χρήσιμη για τη διατήρηση του δαπέδου του θαλάμου στεγνού και καθαρού ώστε η ψύξη να δρα απευθείας στον ατμό και να μην παρατηρούνται κυματισμοί υγρού και συνακολούθως ατμών. Ο θάλαμος τύπου διάχυσης μπορεί να λειτουργήσει για ώρες χωρίς να χρειάζεται να αποστραγγιστεί. Η αποστράγγιση όταν χρειάζεται γίνεται συνήθως απλά με τη βαρύτητα, μέσω μιας οπής στο κύριο πλαίσιο δαπέδου.
- Η πίεση εντός του θαλάμου στην οποία προορίζεται να λειτουργήσει ο θάλαμος νεφώσεως τύπου διάχυσης έχει επίδραση στο σχεδιασμό του. Είναι προφανές ότι ένας θάλαμος σε πίεση μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική δεν θα μπορούσε να έχει μεγάλου εμβαδού τοιχώματα από γυαλί. Επομένως αν ο θάλαμος δεν επικοινωνεί απευθείας με την

ατμόσφαιρα, η πίεσή του θα μπορούσε να διατηρείται κοντά στην ατμοσφαιρική με σύστημα βαλβίδων και δοχείο διαστολής. Φυσικά ένας μικρότερος μηχανικά ισχυρότερος θάλαμος θα μπορούσε να αντέξει τις μεταβολές πίεσης που δημιουργούνται από τη θέρμανση και την ψύξη του θαλάμου. Υπάρχουν σαφή πλεονεκτήματα στη λειτουργία ενός θαλάμου, που διατηρείται κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση. Σε αυτή την περίπτωση πιθανές μικρές διαρροές γίνονται αμελητέες και τα λεπτά παράθυρα μεγάλου εμβαδού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την οπτική αναγνώριση -α και -β σωματιδίων και ακτίνων -x. Επίσης τα ραδιενεργά δείγματα μπορούν να εισαχθούν στο θάλαμο μέσω ενός σωλήνα ή μιας κατάλληλης μικρής θύρας χωρίς μεγάλη επίδραση στη συγκρότηση του νέφους.

- Η κατάλληλη κλίση θερμοκρασίας σε έναν θάλαμο νεφώσεως τύπου διάχυσης προσφέρει (ΣΣ: αν είναι αρκετά ομαλή) μια φυσική σταθερότητα ενάντια σε έντονα φαινόμενα τυρβώδους ροής και τυρβώδους συναγωγής. Γενικά μιλώντας, ο θάλαμος νεφώσεως τύπου διάχυσης δεν είναι τόσο ευαίσθητος στα φαινόμενα συναγωγής. Η λανθάνουσα θερμότητα που απελευθερώνεται από την έντονη εντοπισμένη συμπίκνωση, όπως εμφανίζεται κατά μήκος της τροχιάς ενός -α σωματιδίου μπορεί να επάγει μικρή συναγωγή αλλά η διαταραχή αυτή παραμένει εντοπισμένη και η ισορροπία αποκαθίσταται γρήγορα. Άλλες αιτίες συναγωγής μεγαλύτερης κλίμακας είναι: ο εσφαλμένος συνδυασμός αερίου και ατμού και η θέρμανση από την πηγή φωτός. Επιπλέον, ένας θάλαμος με μεταλλικά τοιχώματα είναι πολύ περισσότερο ευάλωτος σε φαινόμενα συναγωγής σε σχέση με έναν με γυάλινα τοιχώματα δεδομένου ότι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στο μέταλλο είναι πολύ μεγαλύτερος από ότι στο γυαλί. Ακόμα ένας θάλαμος με αναλογία ύψους προς πλάτος 1:2, είναι πολύ περισσότερο ευάλωτος σε φαινόμενα συναγωγής σε σχέση με ένα θάλαμο με αναλογία 1:4.
- Το ηλεκτρικό πεδίο και πως εφαρμόζεται. Στο θάλαμο Langsdorf υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου με κατάλληλο ηλεκτρικά απομονωμένο σύστημα ηλεκτροδίων. Ένα πεδίο μπορεί να αναπτύσσεται μεταξύ της οροφής και του δαπέδου του θαλάμου και μπορεί να φθάσει την τιμή των 2000 V. Το δάπεδο του θαλάμου κρατείται γειωμένο (δυναμικό "0"). Κατά συνέπεια η κλίση του πεδίου υπολογίζεται σε ~130 V/cm. Ένα άλλο πεδίο μπορεί να αναπτύσσεται μέσα στο θάλαμο με τη βοήθεια ενός πλέγματος ηλεκτροδίων. Είναι σαφές ότι η κοσμική ακτινοβολία, τα φωτόνια και όποια άλλη ιοντίζουσα ακτινοβολία σχεδόν παράγει τόσα ιόντα ανά μονάδα όγκου στο πάνω μέρος του θαλάμου νεφώσεως, όπου δεν σχηματίζονται ίχνη όσα παράγει και στο κάτω μέρος,

όπου υπάρχει νέφος και σχηματίζονται ίχνη. Πολλά από τα ιόντα που παράγονται στο ανώτερο μέρος θα διασκορπιστούν προς τα κάτω, έως ότου αρχίσουν να επάγουν φαινόμενα συμπύκνωσης στο νέφος. Συνήθως διαμορφώνουν μια διάχυτη "βροχή" που εμποδίζει άλλες οπτικές παρατηρήσεις. Αυτά τα ιόντα του ανώτερου μέρους μπορούν να αφαιρούνται με τη βοήθεια κατάλληλου ηλεκτρικού πεδίου. Ένα απλό κάθετο ηλεκτρικό πεδίο προσελκύει τα μισά ιόντα στην οροφή του θαλάμου, αλλά τα άλλα μισά παρασύρονται προς τα κάτω στην ευαίσθητη περιοχή του θαλάμου. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί με διάφορους τρόπους. Όταν το ηλεκτρικό πεδίο ενεργοποιείται ξαφνικά, τότε παρατηρείται ο απότομος σχηματισμός ενός "ντους" (shower) συμπύκνωσης που φαίνεται να είναι το αποτέλεσμα της καθοδικής πορείας των ιόντων, τα οποία έχουν δημιουργηθεί σε σχετικά υψηλή συγκέντρωση, σε συνθήκες χωρίς πεδίο. Τα αποτελέσματα από ένα πολυπλοκότερο ηλεκτρικό πεδίο όπως αυτό από το πλέγμα ηλεκτροδίων μπορεί να είναι καλύτερο, να αφαιρούνται δηλαδή περισσότερα από τα ανεπιθύμητα ιόντα. Τα αποτελέσματα παρατήρησης ιχνών με ταυτόχρονη εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου είναι καλύτερα από εκείνα χωρίς ηλεκτρικό πεδίο. Θα πρέπει να τονιστεί ότι το πεδίο προορίζεται μόνο για την αφαίρεση ιόντων προερχόμενα από το μη ευαίσθητο τμήμα του θαλάμου νεφώσεως. Στην ευαίσθητη περιοχή όπου σχηματίζονται ίχνη, τα ιόντα είναι πυρήνες συμπύκνωσης είτε με είτε χωρίς πεδίο και αφαιρούνται από τη βαρύτητα. Ωστόσο, ένα ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να έχει ορατά αποτελέσματα και στην ευαίσθητη περιοχή. Για παράδειγμα, αν ο θερμός ατμός είναι μόλις αρκετός για τη δημιουργία νέφους και την παραγωγή ιχνών συμπύκνωσης, ένα ηλεκτρικό πεδίο θα καταστρέψει πολλά ιόντα και άρα και το σχηματισμό ιχνών εξ ολοκλήρου.

2.5 Σχόλια και συμπεράσματα

Παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν στα βασικά τους σημεία οι δύο κυριότεροι τύποι θαλάμων νεφώσεως: ο τύπου εκτονώσεως (ή θάλαμος Wilson) και ο τύπου διαχύσεως (ή θάλαμος Langsdorf). Σύμφωνα με την ανάλυση διαπιστώνεται ότι υπάρχουν πολλές διαφορές ανάμεσα στα δύο είδη. Οι διαφορές αυτές αφορούν κυρίως στον τρόπο λειτουργίας και την πολυπλοκότητα της κατασκευής τους. Οποσδήποτε η ανιχνευτική ικανότητα και των δύο θαλάμων σε ό,τι αφορά στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι αξιόλογη μέσα στους περιορισμούς του κάθε τύπου. Δεν είναι τυχαίο εξάλλου ότι για τον θάλαμο εκτονώσεως ο Wilson τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ φυσικής. Προκύπτει πάντως ότι ο θάλαμος νεφώσεως τύπου διάχυσης (Langsdorf) παρόλο που είναι πολύπλοκος ξεχωρίζει για τη δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας. Αυτό σύντομα οδήγησε στην παραγωγή απλούστερων

κατασκευών θαλάμων νεφώσεων τύπου διάχυσης, για ευρύτερη χρήση πέρα από την αυστηρά επιστημονική. ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των οποίων θα αναλυθούν στο επόμενο Κεφάλαιο 3. Στους θαλάμους αυτούς η ψυχόμενη επιφάνεια ψύχεται συνήθως με ξηρό πάγο (~-78 °C, δηλαδή παγωμένο CO₂) και σπανιότερα με άλλα μέσα, λιγότερο διαθέσιμα, όπως το υγρό άζωτο (-196 °C). Σημειώνεται εδώ ότι επειδή η ψυχόμενη επιφάνεια στο θάλαμο Langsdorf είναι περίπου στους -70 °C, η βαθμίδα μείωσης της θερμοκρασίας στον θάλαμο αυτό τον ψυχόμενο με ξηρό πάγο είναι μεταξύ περιβάλλοντος και ψυχόμενης επιφάνειας περίπου [20 °C - (-70 °C)] = 90 °C. Φαίνεται επομένως ότι και στους θαλάμους με ξηρό πάγο η βαθμίδα μείωσης της θερμοκρασίας μπορεί να είναι στην ίδια περιοχή. Ασφαλώς στους θαλάμους με υγρό άζωτο η βαθμίδα αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη (~215 °C).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΠΛΟΥΣΤΕΡΟΙ ΘΑΛΑΜΟΙ ΝΕΦΩΣΕΩΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ, ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΙΧΝΩΝ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΜΕ ΥΓΡΟ ΑΖΩΤΟ

3.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο αναλύθηκαν σε ικανοποιητική έκταση, ο θάλαμος νεφώσεως τύπου εκτόνωσης (ή θάλαμος Wilson) και ο θάλαμος νεφώσεως τύπου διάχυσης (ή θάλαμος Langsdorf) ως όργανα ανίχνευσης ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Οι θάλαμοι επιτρέπουν την ανίχνευση διότι προάγουν, σε κατάλληλο περιβάλλον τη συμπύκνωση ατμού, με πυρήνες συμπυκνώσεως τα ιόντα που δημιουργούνται από ακτινοβολίες α , β ή γ ή άλλες. Επειδή μάλιστα τα ιόντα από αυτές τις ακτινοβολίες κινούνται στο χώρο, η παραγόμενη συμπύκνωση διακρίνεται ως ίχνος ή τροχιά μικρού μήκους ευθύγραμμη ή τεθλασμένη ανάλογα με την ακτινοβολία που την προκαλεί. Στον θάλαμο Wilson, οι αναγκαίες θερμοδυναμικές συνθήκες για τη συμπύκνωση δημιουργούνται με τη στιγμιαία ελάττωση της πίεσης (εκτόνωση), ενώ στο θάλαμο Langsdorf, οι συνθήκες για τη συμπύκνωση δημιουργούνται με την ανάπτυξη κατάλληλης βαθμίδας μείωσης της θερμοκρασίας. Διαπιστώθηκε ότι το συγκριτικό πλεονέκτημα του θαλάμου Langsdorf σε σχέση με το θάλαμο Wilson είναι η δυνατότητά του να ανιχνεύει επί μεγάλο χρονικό διάστημα σε αντίθεση με το θάλαμο Wilson, στον οποίο η ανίχνευση γίνεται στιγμιαία. Αυτό οφείλεται στο ότι στο θάλαμο Langsdorf η βαθμίδα μείωσης της θερμοκρασίας διατηρείται επί ικανό χρόνο, ενώ στο θάλαμο Wilson, η εκτόνωση (και άρα η αντίστοιχη πτώση της θερμοκρασίας) διαρκεί πολύ λίγο. Η μέθοδος ανίχνευσης ιχνών ιοντιζουσών ακτινοβολιών με θάλαμο Wilson, παρότι δυσκολότερη λόγω πολύ μικρού χρόνου λειτουργίας, είναι δημοφιλής, διότι τα ίχνη που παράγονται είναι πολύ σαφή. Η μέθοδος με θάλαμο Langsdorf, είναι ευκολότερη λόγω πολύ μεγαλύτερου χρόνου λειτουργίας, αλλά τα παραγόμενα ίχνη μπορεί να είναι από πολύ καλά έως ασαφή και συγκεχυμένα. Και οι δύο θάλαμοι είναι, στη μορφή που χρησιμοποιούνται στο εργαστηριακό περιβάλλον, πολύ σύνθετοι. Ιδιαίτερα μάλιστα ο θάλαμος Langsdorf είναι δύσκολο να ρυθμισθεί. Παρόλα αυτά, φαίνεται ότι οι θάλαμοι Langsdorf είναι αυτοί που μπορούν να απλοποιηθούν ώστε να γίνουν διαθέσιμοι για πιο ερασιτεχνική χρήση. Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφονται απλούστερα είδη θαλάμων νεφώσεως τύπου διάχυσης, που προέκυψαν από τέτοιου είδους απλοποιήσεις. Επίσης γίνεται μία μικρή ανάλυση για τις ιοντιζουσες ακτινοβολίες που θα μπορούσαν να ανιχνευθούν και τη μορφή που έχουν τα παραγόμενα από αυτές ίχνη. Τέλος, παρουσιάζονται οι τεχνικές, τις οποίες διαθέτει το Εργαστήριο Πυρηνικής

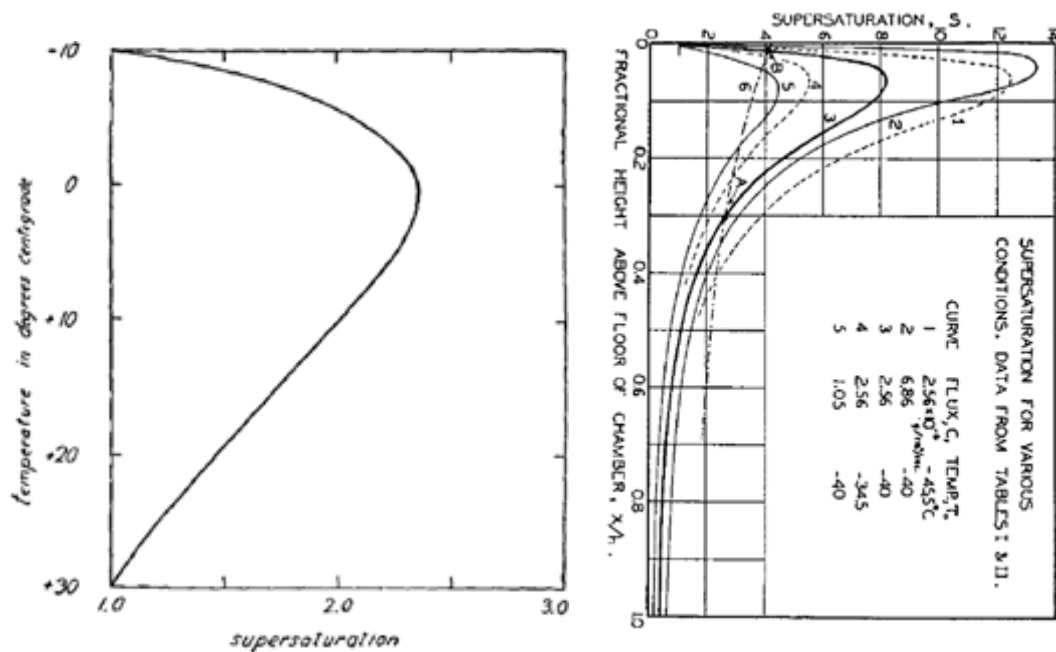
Τεχνολογίας του ΕΜΠ ώστε να χρησιμοποιεί το υγρό άζωτο ως ψυκτικό για διάφορους σκοπούς και κατά συνέπεια και για τους σκοπούς ψύξεως ενός θαλάμου νεφώσεως τύπου διαχύσεως.

3.2 Θάλαμοι νεφώσεως τύπου διάχυσης

3.2.1 Γενικά

Υπάρχουν αρκετά διαφορετικά είδη απλών θαλάμων νεφώσεως τύπου διάχυσης, τα οποία λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο και υπακούουν τις ίδιες θερμοδυναμικές αρχές.

Μία σημαντική θερμοδυναμική προϋπόθεση για την καλή λειτουργία ενός θαλάμου νεφώσεως είναι η εξασφάλιση μίας περιοχής με ατμό, στην οποία η μερική πίεση ατμού είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη πίεση κορεσμού ατμών στη θερμοκρασία του χώρου. Η εξασφάλιση και διατήρηση επί μακρόν μιας τέτοιας περιοχής, γίνεται μέσω της διάχυσης των ατμών σε άλλο κατάλληλο αέριο. Όπως ήδη αναλύθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο 2, αυτό προκύπτει αν η κατακόρυφη μείωση της θερμοκρασίας του μίγματος ατμού - αερίου προάγει τον υπερκορεσμό. Εάν η πίεση και η παροχή του ατμού είναι μικρές, μπορεί να υποτεθεί με καλή προσέγγιση ότι η κατάλληλη βαθμίδα μείωσης της θερμοκρασίας μεταξύ της οροφής και του ψυχόμενου δαπέδου του θαλάμου μπορεί να είναι γραμμική, πράγμα που σημαίνει ότι και η βαθμίδα αύξησης της πυκνότητας του ατμού θα είναι επίσης γραμμική στον ίδιο χώρο. Για τέτοιες συνθήκες και για θάλαμο τύπου διαχύσεως με ατμούς μίγματος προπανόλης 95% σε νερό, στον οποίο η ψυχόμενη επιφάνεια είναι στους $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η απέναντι σε αυτήν θερμότερη επιφάνεια είναι στους $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, η γραμμική μείωση της θερμοκρασίας όπως στο αριστερό γράφημα της Εικόνας 3.1, προάγει τον υπερκορεσμό, όπως εξάλλου και μαθηματικά έχει εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 2, από το δεξί γράφημα της Εικόνας 3.1 (που είναι μία περιστροφή της Εικόνας 2.10).



Εικόνα 3.1: ΑΡΙΣΤΕΡΑ: Τυπικός συντελεστής υπερκορεσμού, με την παραδοχή γραμμικής βαθμίδας μείωσης θερμοκρασίας κατά το ύψος (βλ. Nielsen, 1951). ΔΕΞΙΑ: Συντελεστής υπερκορεσμού κατά το ύψος για διάφορες αρχικές συνθήκες (βλ. Langsdorf, 1939)

Η σύγκριση της πυκνότητας κορεσμού του ατμού με την αναπτυσσόμενη πυκνότητα ατμού, που υπολογίζεται με βάση αυτές τις συνθήκες της Εικόνας 3.1 (αριστερά), παρουσιάζει έναν μέγιστο υπερκορεσμό $S = 2.35$, υπολογιζόμενο ως ο λόγος της πυκνότητας του ατμού, προς την αντίστοιχη πυκνότητα κορεσμού, σε μια σχετικά μικρή απόσταση από την ψυχόμενη επιφάνεια. Η απόσταση αυτή γενικά για τους θαλάμους νεφώσεως τύπου διάχυσης βρίσκεται σε απόσταση ίση με $1/4$ του ύψους τους από την ψυχόμενη επιφάνεια. Ένας τέτοιος λόγος υπερκορεσμού σε μία τέτοια απόσταση από την ψυχόμενη επιφάνεια είναι γενικά ο ελάχιστος κατάλληλος για να παρουσιαστούν ίχνη εξαιτίας ιοντιζουσών ακτινοβολιών.

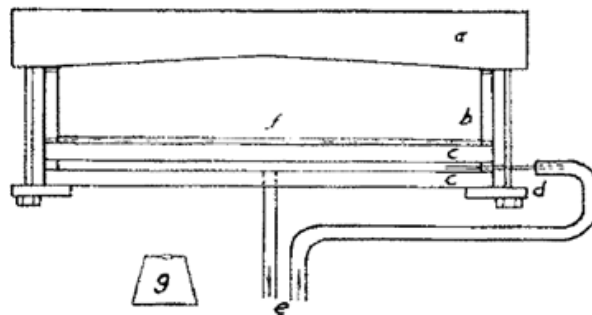
Επιπλέον ένας θάλαμος νεφώσεως τύπου διάχυσης μπορεί να λειτουργεί μόνο αν η πυκνότητα του ατμού στο μίγμα ατμού - αερίου είναι χαμηλότερη κοντά στην ψυχρότερη επιφάνεια, όπως εξάλλου επιβάλλουν και οι νόμοι της διάχυσης (βλ. και την Εικόνα 2.9). Προκύπτει ότι δεν είναι απαραίτητο η διάχυση του ατμού στο αέριο, να είναι καθοδική όπως στον θάλαμο Langsdorf. Είναι δυνατόν να εξελίσσεται και ανοδικά. Μπορεί να υπάρχουν επομένως καθοδικοί και ανοδικοί θάλαμοι. Το αν η διάχυση θα γίνεται ανοδικά ή καθοδικά εξαρτάται από την επιλογή του αερίου και του ατμού. Ένας θάλαμος με βαρύ ατμό διαχεόμενο σε ένα ελαφρύ αέριο είναι δυνατόν να λειτουργήσει με θερμαινόμενο δάπεδο και ψυχόμενη οροφή. Ομοίως ένας θάλαμος με ελαφρύ ατμό διαχεόμενο σε ένα βαρύ αέριο λειτουργεί, όπως έδειξε ο Langsdorf, με ψυχόμενο δάπεδο και θερμαινόμενη οροφή.

Υπενθυμίζεται ότι ο ελαφρύς ατμός στο θάλαμο του Langsdorf ήταν θερμή μεθανόλη CH_3OH ($\text{MB}\approx 32$) και το βαρύ αέριο ήταν CO_2 ($\text{MB}\approx 44$)

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές καθοδικών και ανοδικών θαλάμων νεφώσεως τύπου διάχυσης, οι οποίες βρίσκονται και εξηγούνται λιγότερο ή περισσότερο σε επιστημονικά άρθρα, βιβλία ή και στο διαδίκτυο. Ακολουθούν περιγραφές τυπικών ανοδικών και καθοδικών θαλάμων.

3.2.2 Ανοδικός θάλαμος διάχυσης

Ο ανοδικός θάλαμος διάχυσης ονομάζεται έτσι επειδή σε αυτόν η ψυχόμενη επιφάνεια είναι η οροφή και η θερμότερη είναι το δάπεδο. Για την δημιουργία των ιχνών χρησιμοποιείται n-προπανόλη ως βαρύς ατμός και ήλιο ως ελαφρύ αέριο. Η κατασκευή αυτού του θαλάμου φαίνεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Ένας ανοδικός θάλαμος διάχυσης
(βλ. Nielsen, 1951)

Η διάταξη της Εικόνας 3.2 αποτελείται από τα εξής μέρη:

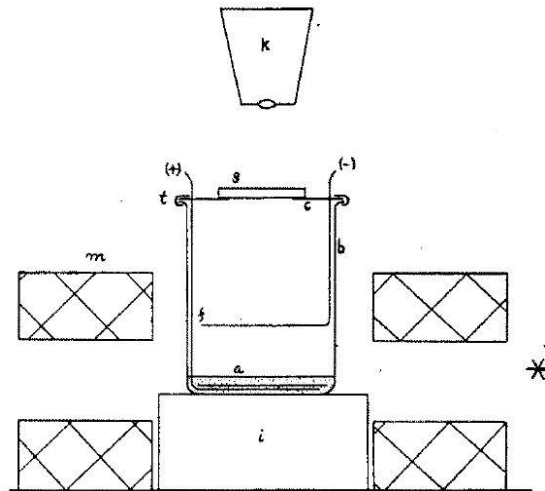
- οροφή από ορείχαλκο, ψύχεται από αλκοόλη που κυκλοφορεί σε κατάλληλα χαμηλή θερμοκρασία
- κύλινδρος από γυαλί
- δάπεδο από γυάλινους δίσκους
- δαχτυλίδι σύσφιξης από ορείχαλκο
- σύστημα ανακυκλοφορίας θερμού νερού
- μίγμα προπανόλης και νερού
- φωτογραφική μηχανή

Η μεταλλική οροφή ψύχεται από αλκοόλη χαμηλής θερμοκρασίας που παρέχεται από κατάλληλο μεταλλικό αγωγό. Το δάπεδο θερμαίνεται με θερμό νερό, το οποίο κυκλοφορεί

στο χώρο μεταξύ των δύο γυάλινων δίσκων. Η διαρροή αλκοόλης από την οροφή λόγω πλημμυρισμού εμποδίζεται από την ελαφρά κωνική κορυφή που ευνοεί την αποστράγγισή της από την περιφέρεια. Σε ό,τι αφορά το ηλεκτρικό πεδίο αρκεί να χρησιμοποιείται ένα κατακόρυφο ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ του θερμαινόμενου δαπέδου και της (παράλληλης) ψυχόμενης οροφής. Το κατακόρυφο πεδίο μετακινεί τα ιόντα, που σχηματίζονται οπουδήποτε στον όγκο του θαλάμου, έτσι ώστε να μην επηρεάζουν την ευαίσθητη περιοχή, με τον τρόπο που έχει ήδη εξηγηθεί (βλ. στο Κεφάλαιο 2). Αν έχουν δημιουργηθεί οι κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας το μεγαλύτερο μέρος των ιόντων από ιοντίζουσες ακτινοβολίες παράγουν ίχνη. Το κατάλληλο τυπικό ύψος του θαλάμου αυτού είναι περί τα 15 cm. Ένας απλούστερος ανοδικός θάλαμος διάχυσης, θα μπορούσε να κατασκευαστεί με μεταλλικό δάπεδο, που να θερμαίνεται άμεσα με φλόγα (π.χ. από λυχνία Bunsen) ή από ένα ηλεκτρικό θερμαντικό στοιχείο και μία μεταλλική οροφή, που να ψύχεται από ένα μείγμα πάγου και άλατος σε άμεση επαφή αυτή. Σε έναν τέτοιο ανοδικό θάλαμο διάχυσης, που λειτουργεί με μίγμα προπανάλης - νερού και ήλιο σε ατμοσφαιρική πίεση, οι υπολογισμοί και η εμπειρία δείχνουν ότι η χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία της οροφής, χωρίς απώλεια σταθερότητας λόγω φαινομένων μεταφοράς θερμότητας, είναι περίπου $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και χαμηλότερες θερμοκρασίες για χαμηλότερη πίεση ηλίου και φυσικά οποιοδήποτε άλλο αέριο που μπορεί να αντικαταστήσει το ήλιο μειώνοντας τη μερική πίεση του, έως ότου η πυκνότητά του γίνει ίδια με του ηλίου. Μια τέτοια υποκατάσταση που δεν μεταβάλλει τη θερμοδυναμική και τη μετάδοση θερμότητας, μπορεί βέβαια να αλλάξει άλλα χαρακτηριστικά λειτουργίας, όπως τη μέγιστη ροή ιόντων που ανιχνεύεται λόγω της αλλαγής του συντελεστή διάχυσης και της θερμικής αγωγιμότητας. Τέτοιοι θάλαμοι έχουν λειτουργήσει με διάφορα μίγματα προπανάλης και νερού. Σε μια περίπτωση μια ευαίσθητη περιοχή 4 περίπου εκατοστών, παρατηρήθηκε σε έναν κύλινδρο ύψους 15 εκατοστών όταν το υγρό μίγμα προς διάχυση ήταν 50 % προπανάλη σε νερό και οι θερμοκρασίες ήταν $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ για την ψυχόμενη οροφή και $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ για το θερμαινόμενο δάπεδο (βλ. Nielsen, 1951).

3.2.2 Καθοδικός θάλαμος διάχυσης

Ο καθοδικός θάλαμος διάχυσης ονομάζεται έτσι επειδή σε αυτόν η ψυχόμενη επιφάνεια είναι το δάπεδο και η θερμότερη είναι η οροφή. Μια απλή μορφή του καθοδικού θαλάμου διάχυσης χρησιμοποιεί ένα πορώδες υλικό στην οροφή του εμποτισμένο με υγρό, το οποίο εξαχνούμενο λειτουργεί ως πηγή του ελαφρού ατμού. Ένας τέτοιος θάλαμος παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3: Ένας καθοδικός θάλαμος διάχυσης
(βλ. Nielsen, 1951)

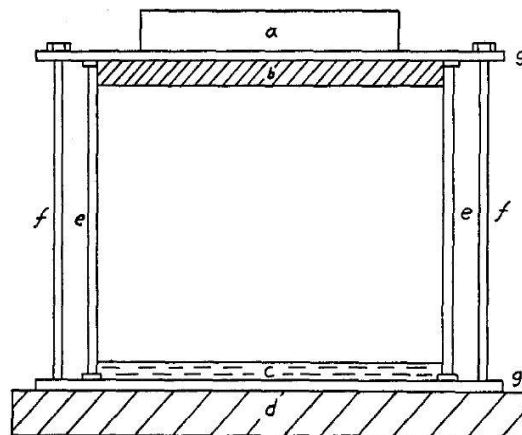
Η συσκευή της Εικόνας 3.3 αποτελείται από τα εξής μέρη:

- a) μαύρο βελούδο εμποτισμένο με αλκοόλη
- b) δοχείο
- c) οροφή από χαρτόνι
- f) ηλεκτρόδια για δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου
- g) παράθυρο από γυαλί
- i) ξηρός πάγος
- k) φωτογραφική μηχανή
- l) πηγή φωτός
- m) μαγνήτης
- t) κολλητική ταινία

Η συσκευή αποτελείται από ένα τυπικό γυάλινο εργαστηριακό δοχείο ζέσεως χημείου όγκου δύο λίτρων, ένα κάλυμμα από χαρτόνι που σφραγίζει το δοχείο με τη βοήθεια κολλητικής ταινίας, κομμάτια ξηρού πάγου και μια πηγή φωτός. Μια καλή λειτουργία επιτυγχάνεται όταν το εξαχνούμενο υγρό είναι μίγμα περίπου 90 % αιθανόλης ή προπανόλης με νερό. Τότε μπορεί να παρατηρηθούν εύκολα καθαρά ίχνη από ιόντα μαζί με διάχυτα ίχνη αλλά και φαινόμενα "βροχής", σε ένα επιφανειακό στρώμα που βρίσκεται περίπου ένα εκατοστό πάνω από το ψυχόμενο δάπεδο. Για τη λήψη φωτογραφιών σε ένα θάλαμο σαν αυτόν της Εικόνας 3.3, μπορεί να τοποθετηθεί κατάλληλο παράθυρο γυάλινο οπτικής παρατήρησης στο

κάλυμμα του δοχείου. Σε αυτήν την περίπτωση το πάτωμα του δοχείου πρέπει να καλυφθεί με ένα κομμάτι από μαύρο ύφασμα (βελούδο ή τσόχα) ώστε οι παραγόμενες φωτογραφίες να έχουν καλή αντίθεση. Το ύφασμα πρέπει να είναι εμποτισμένο με οινόπνευμα 95 %, ώστε να αποτρέπεται ο σχηματισμός πάγου στο δάπεδο για να μην καταστρέφεται η αντίθεση. Η χρήση ηλεκτρικού πεδίου δεν θεωρείται απαραίτητη για να είναι ορατά τα ίχνη, αλλά η εφαρμογή ενός πεδίου μεταξύ δαπέδου και οροφής βοηθάει για τη μείωση του αριθμού των ιχνών που οφείλονται στο υπόστρωμα της φυσικής ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία οροφής σε ένα τέτοιο θάλαμο καταλήγει να είναι ελαφρά κατώτερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η χρήση μαγνητικού πεδίου (π.χ. 8×10^4 Tesla) βοηθάει στο να παρατηρούνται μαγνητικές εκτροπές π.χ. των ιχνών από ηλεκτρόνια

Μια άλλη παραλλαγή καθοδικού θαλάμου νεφώσεως τύπου διάχυσης επίσης κυλινδρικής μορφής μπορεί να συγκροτηθεί ως εξής: Ο ελαφρύς ατμός παράγεται από μία υφασμάτινη επιφάνεια από τσόχα καλυμμένη με βελούδο. Η επιφάνεια αυτή βρίσκεται στερεωμένη στην κάτω επιφάνεια της οροφής, η οποία στην περίπτωση αυτή είναι μεταλλική. Η μεταλλική οροφή θερμαίνεται. Η υφασμάτινη επιφάνεια τηρείται κορεσμένη με υγρό, το οποίο εξαχνούμενο λειτουργεί ως πηγή του ελαφρού ατμού. Η θερμότητα που απαιτείται παρέχεται από ένα ηλεκτρικό θερμαντικό στοιχείο. Το ψυχόμενο δάπεδο του θαλάμου είναι επίσης μεταλλικό και εδράζεται σε ξηρό πάγο. Αυτή η διάταξη διακρίνεται στην Εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4: Ένας δεύτερος καθοδικός θάλαμος διάχυσης (βλ. Nielsen, 1951)

Η συσκευή της Εικόνας 3.4 αποτελείται από τα εξής μέρη:

- a) ηλεκτρικό θερμαντικό στοιχείο αντίστασης
- b) υφασμάτινη επιφάνεια από τσόχα, πάχους 1.2 cm, επενδυμένη με βελούδο (πηγή ατμού)
- c) ποσότητα αλκοόλης

d) ξηρός πάγος

e) κύλινδρος από γυαλί διαμέτρου 25 cm

f) ράβδοι στήριξης

g) πάνω και κάτω πλάκες από χαλκό, πάχους 3 mm

Το πάχος της ευαίσθητης περιοχής εξαρτάται από τις θερμοκρασίες και το υγρό μίγμα που χρησιμοποιείται. Καλύτερα αποτελέσματα ιχνών έχουν επιτευχθεί με μείγματα μεθανόλης και νερού: Για παράδειγμα χρησιμοποιώντας ατμό μίγματος μεθανόλης 70% και νερού παράγεται μία ευαίσθητη ύψους περίπου 12 cm, σε ένα θάλαμο ύψους 14 cm και διαμέτρου 25 cm. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα καλύτερα ίχνη επιτεύχθηκαν σε συνθήκες στις οποίες το ύψος της ευαίσθητης περιοχής είναι λιγότερο από το μέγιστο. Εντούτοις, φαίνεται ότι με την κατάλληλη επιλογή των θερμοκρασιών και του μίγματος, το μεγαλύτερο μέρος του όγκου του θαλάμου μπορεί να γίνει ευαίσθητο και να ανιχνεύσει. Αν και τα περισσότερα από τα πειράματά σε καθοδικούς θαλάμους διάχυσης πραγματοποιούνται με ψύξη ξηρού πάγου, οι θερμοκρασίες ξηρού πάγου δεν είναι απαραίτητες για την παραγωγή των ιχνών από ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Τα ίχνη μπορούν να δημιουργηθούν και με άλλα ψυκτικά μέσα, όπως το υγρό άζωτο.

3.3 Ίχνη από ιοντίζουσες ακτινοβολίες σε θαλάμους διάχυσης

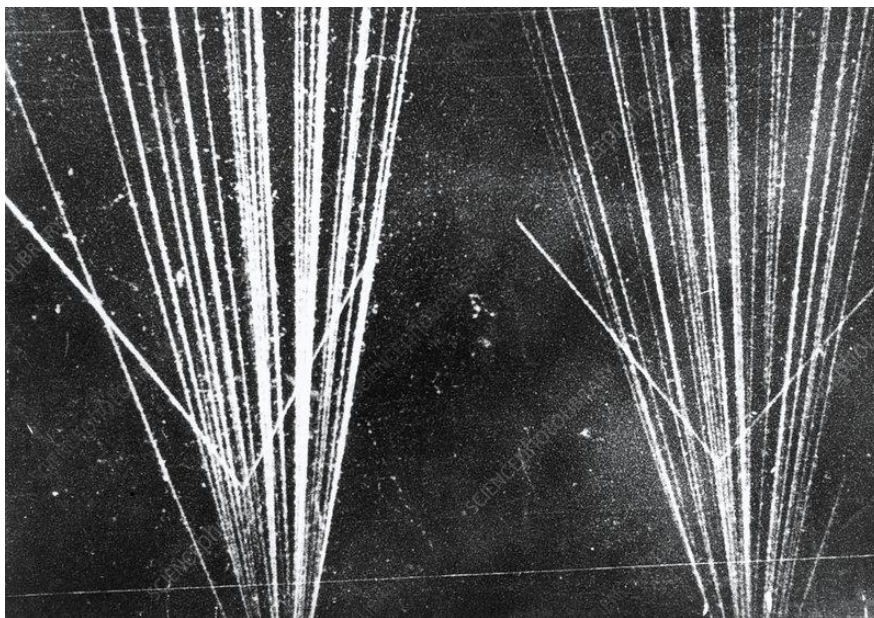
3.3.1 Γενικά

Οι θάλαμοι νεφώσεως τύπου διάχυσης χρησιμοποιούνται κυρίως για την ποιοτική παρατήρηση ιοντιζουσών ακτινοβολιών διαφόρων ειδών και προελεύσεως. Ανάλογα με το είδος και την προέλευση της ακτινοβολίας παράγονται και ίχνη διαφορετικής μορφής. Οι διαφορετικές μορφές των ιχνών επιτρέπουν την αναγνώριση του είδους της αντίστοιχης ακτινοβολίας. Μια πρώτη κατηγοριοποίηση των ιοντιζουσών ακτινοβολιών που ανιχνεύονται έχει να κάνει με τη συχνότητα ανίχνευσης: υπάρχουν δηλαδή ιοντίζουσες ακτινοβολίες που ανιχνεύονται συχνά, άλλες που ανιχνεύονται σπανιότερα και άλλες που ανιχνεύονται πολύ σπάνια. Αναφέρεται ότι την κατηγοριοποίηση αυτή προτείνεται από τον κατασκευαστή επαγγελματικών θαλάμων νεφώσεως τύπου διάχυσης NULEDO s.r.o. στην Τσεχία (πηγή: www.nuledo.com).

3.3.2 Συχνά και εύκολα παρατηρούμενα ίχνη

Είναι αυτά που οφείλονται κυρίως στα παρακάτω είδη ιοντιζουσών ακτινοβολιών

- -α σωματίδια: Το -α σωματίδιο αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια, είναι δηλαδή ένας πυρήνας ηλίου. Τα -α σωματίδια προέρχονται τόσο από διασπάσεις ασταθών πυρήνων όσο και από πυρηνικές αντιδράσεις. Τα -α σωματίδια είναι θετικά φορτισμένα και λόγω της μεγάλης τους μάζας είναι ακτινοβολία με πολύ μικρή εμβέλεια στη στερεά ύλη, παρόλο που η κινητική τους ενέργεια είναι της τάξεως των αρκετών MeV. Ένα -α σωματίδιο δεν μπορεί να διαπεράσει ένα φύλλο χαρτιού ή να διασχίσει περισσότερο από λίγα εκατοστά αέρα. Κάποιες από τις φυσικές πηγές -α ακτινοβολίας είναι τα ισότοπα του ουρανίου (μέταλλα), το ράδιο-226 (μέταλλο) και το ευγενές αέριο ραδόνιο-222. Το ραδόνιο-222 είναι γνωστό ότι συγκεντρώνεται στο εσωτερικό κτιρίων προερχόμενο από το γήινο αέριο. Ένα παράδειγμα τεχνητής (δεν υπάρχει στη φύση) πηγής -α σωματιδίων είναι το ισότοπο Αμερίκιο-241. Τα σωματίδια -α ως θετικά φορτισμένα κατιόντα λειτουργούν ως πυρήνες συμπυκνώσεως και δημιουργούν σε θάλαμο ευθύγραμμο ίχνη σχετικά παχύτερα και μεγαλύτερου μήκους, όπως στην Εικόνα 3.5. Για την παρατήρηση -α σωματιδίων σε θάλαμο, πρέπει η σχετική πηγή -α σωματιδίων (φυσική ή τεχνητή) να τοποθετηθεί μέσα στο θάλαμο κοντά στην ευαίσθητη περιοχή. Τα ίχνη από αυτά τα -α σωματίδια θα φαίνονται σαν να πηγάζουν από την επιφάνεια της πηγής. Τα -α σωματίδια που πιθανόν παράγονται έξω από τον θάλαμο δεν μπορούν να διαπεράσουν τα τοιχώματά του και να ανιχνευτούν.



Εικόνα 3.5: Ίχνη από -α σωματίδια σε θάλαμο νεφώσεως (πηγή: www.sciencephoto.com)

- Ηλεκτρόνια: Τα ηλεκτρόνια προέρχονται τόσο από διασπάσεις ασταθών πυρήνων όσο και από αλληλεπιδράσεις (σκεδάσεις) φωτονιακών ακτινοβολιών με την ύλη και αποτελούν

μέρος ενός είδους ακτινοβολίας που ονομάζεται β ακτινοβολία. Τα ηλεκτρόνια είναι αρνητικά φορτισμένα, έχουν πολύ μικρή μάζα και κινητική ενέργεια στην περιοχή από 0 έως λίγες εκατοντάδες keV. Η διαπεραστική ικανότητα των ηλεκτρονίων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν των α σωματιδίων κυρίως λόγω της μικρής τους μάζας. τα ηλεκτρόνια μπορούν να θωρακισθούν αποτελεσματικά από μία λεπτή πλάκα μολύβδου πάχους 1 mm. Μια τυπική τεχνητή πηγή παραγωγής ηλεκτρονίων είναι το ισότοπο στρόντιο-90, τα ηλεκτρόνια παράγονται από τη διάσπασή του. Τα ηλεκτρόνια ως αρνητικά φορτισμένα ιόντα λειτουργούν ως πυρήνες συμπυκνώσεως και δημιουργούν σε θάλαμο ίχνη σχετικά μικρής διαμέτρου και σχετικά μικρότερου μήκους, ευθύγραμμα, τεθλασμένα ή καμπυλωτά, όπως στην Εικόνα 3.6. Το μήκος και το σχήμα ενός ίχνους από ηλεκτρόνιο, εξαρτάται πολύ από την ενέργειά του ηλεκτρονίου. Τα ίχνη από ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας είναι ευθείες γραμμές, ενώ τα ίχνη από ηλεκτρόνια με χαμηλότερη ενέργεια αλλάζουν εύκολα την κατεύθυνσή τους λόγω συγκρούσεων του ηλεκτρονίου με μόρια του αέριου μίγματος του θαλάμου. Για την παρατήρηση ηλεκτρονίων σε θάλαμο, πρέπει η σχετική πηγή ηλεκτρονίων (φυσική ή τεχνητή) να τοποθετηθεί μέσα στο θάλαμο κοντά στην ευαίσθητη περιοχή. Τα ίχνη από αυτά τα ηλεκτρόνια θα φαίνονται σαν να πηγάζουν από την επιφάνεια της πηγής. Αν η πηγή είναι στρόντιο-90 τότε τα παραγόμενα ίχνη σχηματίζονται σαν να παράγονται από ακτινικό ανεμιστήρα. Τα ηλεκτρόνια που πιθανόν παράγονται έξω από τον θάλαμο σε κάποιες περιπτώσεις και αν η ενέργειά τους είναι αρκετά μεγάλη μπορούν να διαπεράσουν τα τοιχώματά του και να ανιχνευτούν.



Εικόνα 3.6: Ίχνη από ηλεκτρόνια σε θάλαμο νεφώσεως (πηγή: www.nuledo.com)

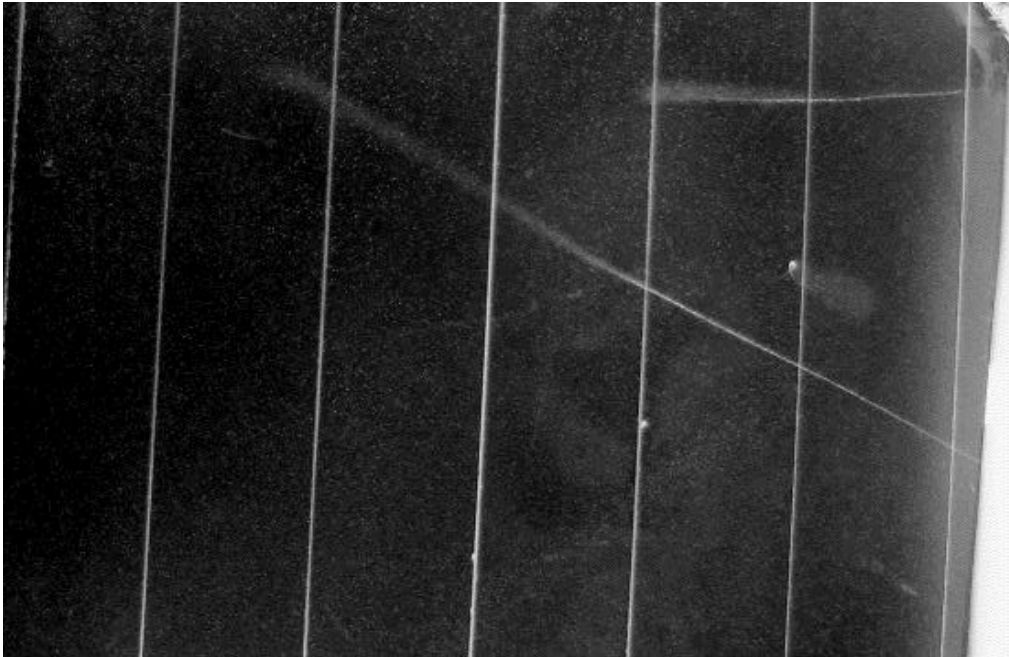
- Ποζιτρόνια: Τα ποζιτρόνια προέρχονται από διασπάσεις ασταθών πυρήνων ή από την κοσμική ακτινοβολία και αποτελούν το υπόλοιπο συμπληρωματικό μέρος ενός είδους ακτινοβολίας που ονομάζεται β ακτινοβολία. Τα ποζιτρόνια είναι το πρώτο σωματίδιο αντιύλης που ανακαλύφθηκε και αποτελεί το αντισωματίδιο ενός ηλεκτρονίου. Τα ποζιτρόνια είναι θετικά φορτισμένα, έχουν πολύ μικρή μάζα (ίση με τη μάζα ενός ηλεκτρονίου) και κινητική ενέργεια στην περιοχή από 0 έως λίγες εκατοντάδες keV. Η διαπεραστική ικανότητα των ποζιτρονίων είναι παρόμοια με αυτή των ηλεκτρονίων. Ένα παράδειγμα μιας φυσικής πηγής ποζιτρονίων είναι το ισότοπο κάλιο-40. Τεχνητές πηγές ποζιτρονίων χρησιμοποιούνται στην ιατρική, συγκεκριμένα στη διαγνωστική μέθοδο τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίων (PET). Τα ποζιτρόνια ως θετικά φορτισμένα ιόντα λειτουργούν ως πυρήνες συμπακνώσεως και δημιουργούν σε θάλαμο ίχνη παρόμοια με αυτά των ηλεκτρονίων. Τα ίχνη από ποζιτρόνια μπορούν να διακριθούν από τα ίχνη από ηλεκτρόνια μόνο όταν ο θάλαμος τοποθετείται σε μαγνητικό πεδίο. Αυτό αναγκάζει τις τροχιές των ηλεκτρονίων και των ποζιτρονίων και τα αντίστοιχα παραγόμενα ίχνη να καμφθούν σε αντίθετες κατευθύνσεις λόγω του αντίθετου φορτίου.
- Έμμεση παρατήρηση φωτονίων (σκέδαση Compton): Τα φωτόνια, ή γ ακτινοβολία, δεν είναι άμεσα ορατά σε θάλαμο νεφώσεως επειδή είναι ακτινοβολία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και όχι φορτισμένα σωματίδια. Ωστόσο, αυτό είναι δυνατόν να αντισταθμιστεί μερικώς τοποθετώντας μια πηγή φωτονίων έξω από το θάλαμο κοντά στα τοιχώματα του θαλάμου. Τα ηλεκτρόνια που αποσπώνται από το τοίχωμα του θαλάμου λόγω σκεδάσεων τύπου Compton μπορούν να αλληλεπιδράσουν με το θάλαμο και να επιτρέψουν έτσι την έμμεση ανίχνευση ακτινοβολίας φωτονίων. Τα ίχνη από ηλεκτρόνια που οφείλονται σε φωτόνια και δεν συνδέονται με πηγές ηλεκτρονίων ή πηγές φωτονίων αποδίδονται στη φυσική φωτονιακή ακτινοβολία υποστρώματος και παράγονται σε τυχαίες θέσεις στο θάλαμο.

3.3.3 Σπανιότερα και δυσκολότερα παρατηρούμενα ίχνη

Είναι αυτά που οφείλονται κυρίως στα παρακάτω είδη ιοντιζουσών ακτινοβολιών:

- Πρωτόνια: Τα πρωτόνια είναι θετικά φορτισμένα ιόντα και σωματίδια των πυρήνων των ατόμων. Έχουν μάζα περίπου 1800 φορές μεγαλύτερη από αυτή του ηλεκτρονίου ή του ποζιτρονίου. Δεν παρατηρούνται ελεύθερα στη φύση. Παράγονται αποσπώμενα από πυρήνες συνήθως με τεχνητό τρόπο από κατάλληλες πυρηνικές αντιδράσεις. Αν υπάρχει

ανάγκη τους αποδίδεται η κατάλληλη κινητική ενέργεια με τη βοήθεια κατάλληλου ηλεκτρικού πεδίου σε διατάξεις που ονομάζονται επιταχυντές. Τα ίχνη από πρωτόνια είναι παχιά αλλά μπορεί να διαφέρουν πολύ σε μήκος. Πιο συγκεκριμένα το μήκος τους μπορεί να εξαντλεί όλο το πλάτος του θαλάμου ή μπορεί να είναι μια κουκκίδα, ανάλογα με την ενέργεια του πρωτονίου και ανάλογα και με τη γωνία, με την οποία το πρωτόνιο εισέρχεται στο θάλαμο. Σχετική είναι η Εικόνα 3.7.



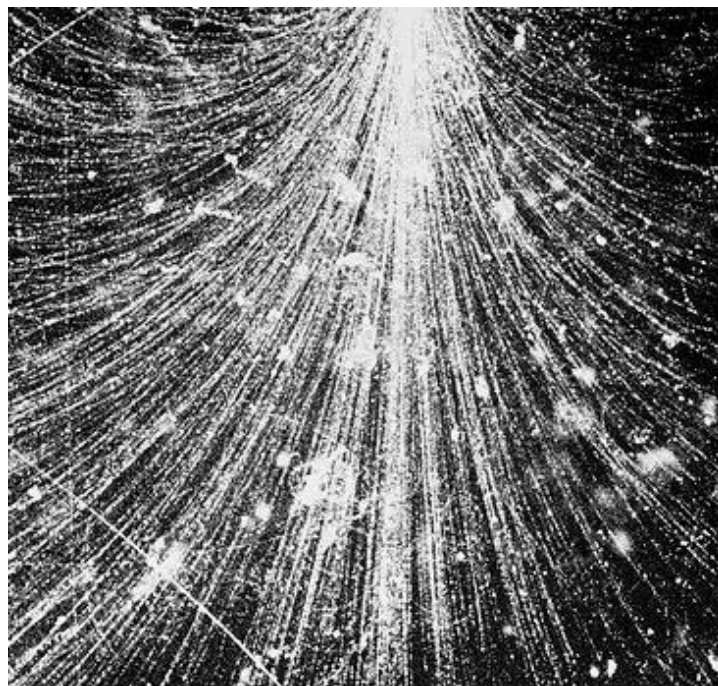
Εικόνα 3.7: Ίχνη από πρωτόνια σε θάλαμο νεφώσεως (πηγή: fusor.net)

- Μιόνια: Τα μίονια είναι ακτινοβολία που δημιουργείται από την αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ύλη. Το φορτίο τους είναι ίσο με αυτό του ηλεκτρονίου, η μάζα τους είναι 200 φορές μεγαλύτερη και η τυπική κινητική τους ενέργεια είναι στα 4 MeV. Τα μίονια που παράγονται και κινούνται προς το έδαφος με ταχύτητα κοντά στην ταχύτητα του φωτός μπορούν να φτάσουν στην επιφάνεια της γης πριν αποσυντεθούν. Τα μίονια μπορούν να παρατηρούνται σε ένα θάλαμο, ακριβώς λόγω της χρονικής διαστολής στο σύστημα του παρατηρητή που συνεπάγεται η πολύ μεγάλη ταχύτητά τους, μία από τις συνέπειες της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας. Τα ίχνη τους σε ένα θάλαμο είναι παρόμοια με αυτά των ηλεκτρονίων, αλλά εντελώς ευθύγραμμα λόγω της μεγάλης τους ταχύτητας. Σχετική είναι η Εικόνα 3.8.



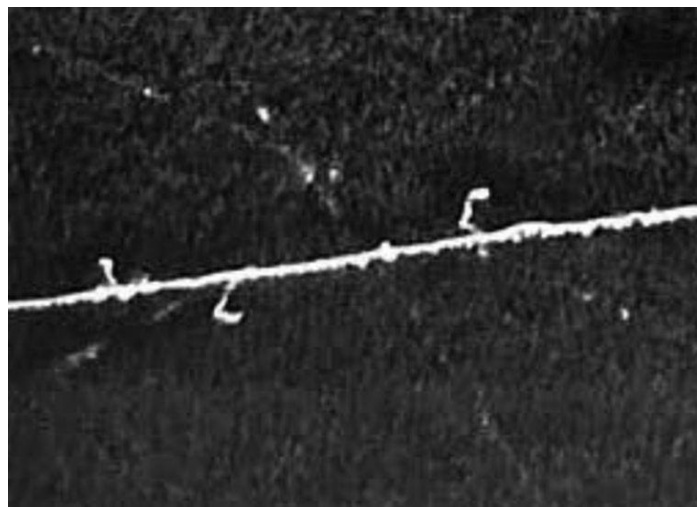
Εικόνα 3.8: Τχνη από μίονια σε θάλαμο νεφώσεως (πηγή: waynesthisandthat.com)

- Καταιγίδα ιχνών (cosmic ray shower): Η κοσμική ακτινοβολία είναι πυρηνικά σωματίδια, που προέρχονται από το διάστημα (κυρίως από τον ήλιο αλλά και από το διαστρικό ή ακόμα και διαγαλαξιακό χώρο), και τα οποία προσβάλλουν την ύλη της ανώτερης ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα την παραγωγή πιονίων. Τα πιόνια διασπώμενα παράγουν φωτόνια μεγάλης ενέργειας. Αν αυτά αλληλεπιδράσουν με τα τοιχώματα του θαλάμου ή την ύλη του θαλάμου παράγεται μία καταιγίδα ιχνών τα οποία οφείλονται στα δευτερογενώς ή τριτογενώς παραγόμενα ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια. Σχετική είναι η Εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.8: Καταιγίδα ιχνών σε θάλαμο νεφώσεως (πηγή: www.sciencephoto.com)

- -δ ακτινοβολία: Η -δ ακτινοβολία είναι δευτερογενή ηλεκτρόνια από ιονισμούς ύλης λόγω αλληλεπιδράσεων με ακτινοβολία. Τα ηλεκτρόνια της -δ ακτινοβολίας προκύπτουν με μεγάλη κινητική ενέργεια και ως εκ τούτου είναι δυνατόν να απομακρύνονται πολύ από την περιοχή των αλληλεπιδράσεων. Τέτοια ηλεκτρόνια δημιουργούνται κυρίως από την αλληλεπίδραση βαρέων σωματιδίων μεγάλης κινητικής ενέργειας με την περιβάλλουσα ύλη. Για παράδειγμα από την αλληλεπίδραση πρωτονίων μεγάλης κινητικής ενέργειας με μόρια αλκοόλης. Στο θάλαμο το φαινόμενο παρατηρείται ως ευθύ καθαρό ίχνος που οφείλεται στο πρωτόνιο περιβαλλόμενο από λεπτά ίχνη που οφείλονται στα παραγόμενα δευτερογενή ηλεκτρόνια. Σχετική είναι η Εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.8: Ακτινοβολία -δ σε θάλαμο νεφώσεως (πηγή: www.fzu.cz)

- Ίχνη σχήματος V: Τα ίχνη σχήματος V δημιουργούνται από δύο -α σωματίδια, τα οποία εκπέμπονται ταυτόχρονα ή σχεδόν ταυτόχρονα σε μια πολύ μικρή περιοχή του χώρου του θαλάμου. Για παράδειγμα αν στον θάλαμο υπάρχει ραδόνιο-220 (χρόνος ημιζωής 55 s) τότε αυτό διασπάται προς πολώνιο-216 (χρόνος ημιζωής 0.145 s) εκπέμποντας -α σωματίδιο, το οποίο με τη σειρά του διασπάται προς μόλυβδο-212 (χρόνος ημιζωής 10.6 h) εκπέμποντας επίσης -α σωματίδιο. Ο πολύ μικρός χρόνος ημιζωής του πολωνίου-216 σημαίνει ότι το εκπεμπόμενο από αυτό -α σωματίδιο παράγεται σχεδόν ταυτόχρονα με το -α σωματίδιο που εκπέμπεται από το ραδόνιο-220. Δεδομένου ότι τα δύο -α σωματίδια είναι θετικά φορτισμένα θα απωθούνται το ένα από το άλλο παράγοντας δύο ίχνη που, ξεκινώντας από το ίδιο σημείο σχηματίζουν V.

3.3.4 Σπάνια παρατηρούμενα φαινόμενα

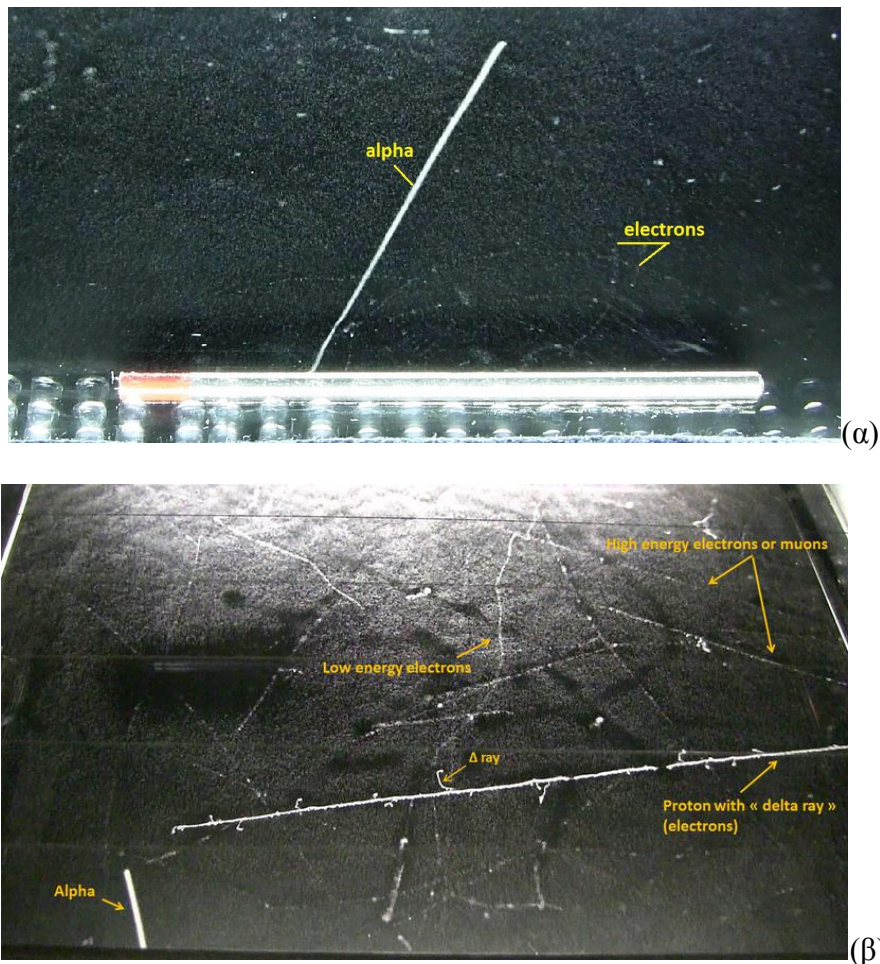
Σε θάλαμο νεφώσεως τύπου διάχυσης είναι δυνατόν να παρατηρηθούν ίχνη που οφείλονται σε πόνια, σε καόνια, σε διασπάσεις μιονίων (αδύναμη αλληλεπίδραση), σε ελαστική σκέδαση πρωτονίων, σε εξαύλωση ύλης - αντιύλης και στο σωματίδιο OMG ("Oh My God", σωματίδια κοσμικής ακτινοβολίας πάρα πολύ υψηλής κινητικής ενέργειας). Οι λεπτομέρειες για τα ίχνη από αυτές τις αλληλεπιδράσεις δεν θα απασχολήσουν σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία.

3.3.5 Παραδείγματα πειραμάτων σε θάλαμο

Παρακάτω δίνονται δύο τυπικά πειράματα που μπορεί να πραγματοποιούνται σε θάλαμο νεφώσεως τύπου διάχυσης:

- Παρατήρηση του χρόνου ημιζωής του ραδονίου-220: Όπως είναι γνωστό ο χρόνος ημιζωής είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε να διασπασθούν οι μισοί από τους διαθέσιμους ασταθείς πυρήνες ενός ισοτόπου. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να διαπιστωθεί σε ένα θάλαμο αν χρησιμοποιηθεί αέριο ραδόνιο-220, του οποίου ο χρόνος ημιζωής είναι 55 s, ως εξής: Ραδόνιο-220 εισάγεται στο θάλαμο και ξεκινάει η παρατήρηση και η (φωτογραφική ή με βίντεο) μέτρηση των σχηματιζόμενων ιχνών σχήματος V σε χρονικά διαστήματα ανά 55 s. Όπως αναμένεται προκύπτει ότι κάθε 55 s τα ίχνη σχήματος V μειώνονται στο μισό επαληθεύοντας το χρόνο ημιζωής του ραδονίου-220.
- Απεικόνιση των διασπάσεων της ραδιενεργού σειράς θορίου-232: Όπως είναι γνωστό η σειρά θορίου-232 είναι μία από τις τέσσερις ραδιενεργές σειρές διασπάσεων που υπάρχουν στη φύση, για τις οποίες ισχύει ότι ο χρόνος ημιζωής του πρώτου πατρικού πυρήνα είναι πάρα πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο ημιζωής οποιουδήποτε από τους παραγόμενους θυγατρικούς πυρήνες. Σε ένα θάλαμο νεφώσεως είναι δυνατόν να παρατηρηθεί εύκολα ένα μέρος της σειράς Θορίου, αυτό που ξεκινάει με το ραδόνιο-220, το οποίο διασπάται προς πολώνιο-216 και αυτό με τη σειρά του προς μόλυβδο-212 (ίχνη σχήματος V) και αυτό με τη σειρά του (με $-\beta$ ακτινοβολία) προς βισμούθιο-212 κοκ. Δηλαδή κατά την παρατήρηση της σειράς μπορεί να προκύπτουν ίχνη σχήματος V από $-\alpha$ σωματίδια που παράγονται ταυτόχρονα, ίχνη από $-\alpha$ σωματίδια, ίχνη από ηλεκτρόνια λόγω διασπάσεων, ίχνη από δευτερογενή ηλεκτρόνια λόγω εκπομπής και σκέδασης φωτονίων κ.ά. Επομένως η παρατήρηση των διασπάσεων της σειράς του θορίου σε θάλαμο δίνει ίχνη που οφείλονται τόσο σε εύκολα παρατηρούμενα φαινόμενα όσο και σε άλλα σπανιότερα (τα ίχνη σχήματος V).

Γίνεται ασφαλώς φανερό από τα όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.3, ότι είναι αρκετά δύσκολο και απαιτεί σημαντική εμπειρία να διαχωρίσει κανείς τα παρατηρούμενα ίχνη ανά ακτινοβολία που τα προκαλεί δεδομένου ότι πολλά από αυτά έχουν κοινά σημεία με άλλα. Υπάρχουν βεβαίως φωτογραφικές απεικονίσεις από διαφορετικά είδη ιχνών που καταγράφονται ταυτόχρονα ώστε να γίνονται περισσότερο κατανοητές οι διαφορές ή οι ομοιότητες. Σχετική είναι η επόμενη Εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.9: Σύγκριση ιχνών από διάφορες ακτινοβολίες
(πηγές: για την εικόνα "α" www.radiation-dosimetry.org, για την εικόνα "β" commons.wikimedia.org)

3.4 Ψύξη με υγρό άζωτο

3.4.1 Γενικά

Όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα, για τη λειτουργία των θαλάμων νεφώσεως τύπου διάχυσης είναι απαραίτητη η ανάπτυξη διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ δύο παράλληλων επιφανειών: της συνήθως θερμαινόμενης οροφής και του ψυχόμενου δαπέδου. Αν η θερμαινόμενη επιφάνεια βρίσκεται στη θερμοκρασία του Εργαστηρίου, έστω 20 °C, τότε η

ψυχόμενη επιφάνεια πρέπει τυπικά να βρίσκεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη κατά περίπου 90 °C. Στην πλειοψηφία των πειραμάτων με θάλαμο αυτού του είδους, η μάλλον ισχυρή ψύξη επιτυγχάνεται με τη χρήση ξηρού πάγου. Η επιλογή του ξηρού πάγου δεν είναι τυχαία καθώς συνδυάζει βασικά πλεονεκτήματα, όπως η διαθεσιμότητα του στην αγορά, η κατάλληλη θερμοκρασία του (~-78 °C) και η εύκολη χρήση του. Ένα άλλο ψυκτικό μέσο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το υγρό άζωτο (-196 °C), το οποίο όμως δεν χρησιμοποιείται ευρέως στους θαλάμους νεφώσεως. Οι λόγοι που δεν προτιμάται είναι οι παρακάτω: (α) δεν είναι τόσο εύκολα διαθέσιμο όσο ο ξηρός πάγος, παρασκευάζεται από κατασκευαστές με πολύ ειδική τεχνογνωσία, (β) είναι δυσκολότερο στη χρήση από τον ξηρό πάγο και λόγω της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας του είναι δυνατόν να προκαλέσει ευκολότερα κρυοπαγήματα, (γ) η χρήση του σε κλειστούς και όχι καλά αεριζόμενους χώρους μπορεί να αλλάξει τη σύνθεση της τοπικής ατμόσφαιρας σε βάρος της αναλογίας του οξυγόνου, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος ασφυξίας. Παρόλα αυτά στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ) υπάρχει διαθεσιμότητα υγρού αζώτου από ειδική δεξαμενή ενώ δεν υπάρχει και δεν μπορεί να αγοραστεί εύκολα ξηρός πάγος. Ο λόγος που το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει υγρό άζωτο είναι διότι αυτό είναι αναγκαίο για την ψύξη των ημιαγωγών ανιχνευτών γερμανίου που λειτουργούν σε αυτό για εφαρμογές -γ φασματοσκοπικής ανάλυσης υψηλής διακριτικής ικανότητας. Με αυτό ως δεδομένο, ο θάλαμος νεφώσεως τύπου διαχύσεως που μπορεί να δοκιμασθεί στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας επιλέχθηκε να ψύχεται με υγρό άζωτο. Στη συνέχεια αναλύεται η αλυσίδα αποθήκευσης και διάθεσης υγρού αζώτου που λειτουργεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και η οποία θα χρησιμοποιηθεί και για τα αναγκαία πειράματα με θάλαμο για την Διπλωματική Εργασία.

3.4.2 Υγρό άζωτο

Το άζωτο είναι ένα διατομικό στοιχείο (N_2). Το υγρό άζωτο είναι υγροποιημένο αέριο άζωτο και συχνά συμβολίζεται με τη λατινική συντόμευση LN_2 ή την LN. Το άζωτο υγροποιήθηκε πρώτη φορά στο Πολωνικό Πανεπιστήμιο Jagiellonian το 1883. Ο διατομικός χαρακτήρας στο αέριο άζωτο διατηρείται ακόμα και μετά την υγροποίηση. Παράγεται βιομηχανικά με κλασματική απόσταξη του αέρα και ως υγρό, αν η πίεση είναι ατμοσφαιρική, βρίσκεται στην εξαιρετικά χαμηλή θερμοκρασία βρασμού των -196 °C. Το υγρό άζωτο είναι άχρωμο, διαφανές με πυκνότητα στο σημείο βρασμού 0.807 g/cm^3 . Χρησιμοποιείται κυρίως ως κρυογονικό για να προκαλεί γρήγορη ψύξη ή να συντηρεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Όταν αποθηκεύεται κατάλληλα σε μονωμένα δοχεία ή δεξαμενές μπορεί να μεταφέρεται και να αποθηκεύεται για περιορισμένο χρονικό διάστημα και μέχρι φυσικά η αναπόδραστη

θερμότητα του περιβάλλοντος να το ατμοποιήσει πλήρως. Οι πλέον κατάλληλες μονωμένες δεξαμενές και μονωμένα δοχεία για το σκοπό αυτό είναι αυτά με διπλά τοιχώματα. Μεταξύ των διπλών τοιχωμάτων των δεξαμενών ή των δοχείων, υπάρχει κενό για να επιτυγχάνεται καλύτερη μόνωση. Οι δεξαμενές και τα δοχεία αυτού του είδους είναι γνωστά με την ονομασία Dewar. Ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα τους, ο χρόνος διατήρησης του υγρού αζώτου σε δεξαμενές ή δοχεία Dewar μπορεί να ποικίλει από μερικές ώρες σε μερικές εβδομάδες. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας Dewar και η φύλαξη του υγρού αζώτου σε τέτοιες δεξαμενές υπό πίεση, έχει επιτρέψει την αποθήκευση και τη μεταφορά του για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους με απώλειες της τάξης του 2% ανά ημέρα ή και λιγότερο. Το υγρό άζωτο στερεοποιείται στους $-210\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το υγρό άζωτο ατμοποιείται (αεριοποιείται) αμέσως αν έρθει σε επαφή με οποιοδήποτε αντικείμενο θερμότερο από αυτό.

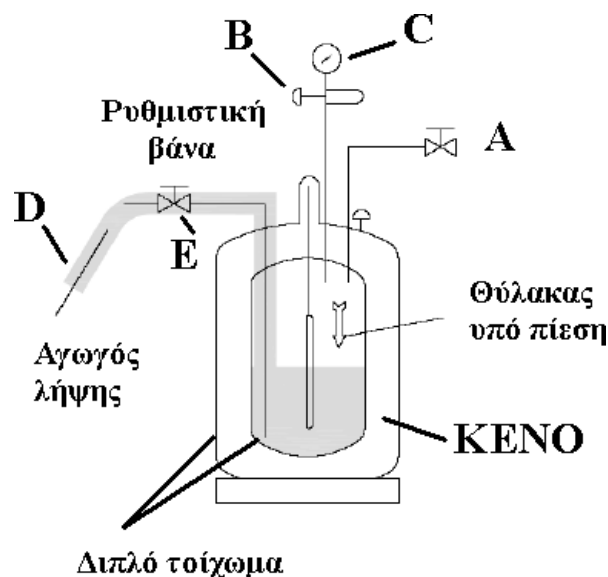
3.4.3 Δεξαμενή αποθήκευσης υγρού αζώτου (ΕΠΤ-ΕΜΠ)

Το υγρό άζωτο στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου προμηθεύει σήμερα (2020) η εταιρεία αερίων Air-Liquide στο πλαίσιο σύμβασής της με το ΕΜΠ. Το άζωτο μεταφέρεται από τις κεντρικές εγκαταστάσεις της εταιρείας στη δυτική Αττική με κατάλληλα βυτία Dewar και αποθηκεύεται υπό πίεση σε δύο, ενοικιαζόμενες από την Air-Liquide, μεγάλες χαλύβδινες κυλινδρικές δεξαμενές Dewar ονομαστικής χωρητικότητας 1000 L. Η μία από τις δεξαμενές βρίσκεται έξω από το "Κτίριο Φυσικής" στη Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών και η άλλη έξω από το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας (κτίριο Κ) στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών.



Εικόνα 3.10: Κυλινδρική δεξαμενή Dewar 1000 L για υγρό άζωτο στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Η Air-Liquide πληρώνει εκ νέου τις δεξαμενές κάθε φορά που αδειάζουν. Η θέση των δεξαμενών επιλέχθηκε έτσι ώστε αυτές να βρίσκονται κοντά στις κύριες καταναλώσεις (δηλ. τα Εργαστήρια Φυσικής και το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας). Από τη δεξαμενή κοντά στα Εργαστήρια Φυσικής εξυπηρετούνται και άλλες Σχολές με δευτερεύουσες καταναλώσεις, όπως π.χ. η Σχολή Χημικών Μηχανικών. Από τη δεξαμενή στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας εξυπηρετούνται και άλλες δευτερεύουσες καταναλώσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Στην Εικόνα 3.10 διακρίνεται η δεξαμενή στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας. Η λειτουργία των δεξαμενών αυτού του τύπου έχει χονδρικά ως εξής (βλ. και το σκαρίφημα δεξαμενής στην Εικόνα 3.11):



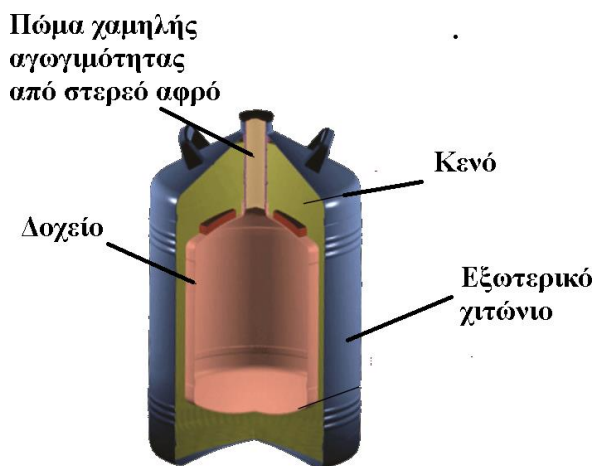
Εικόνα 3.11: Σκαρίφημα δεξαμενής Dewar για υγρό άζωτο (πηγή: twcryo.com)

Η δεξαμενή πληρώνεται με υγρό άζωτο από τον αγωγό Α μέχρι ένα ύψος κοντά στην οροφή. Στον υπόλοιπο κενό όγκο αφήνεται να παραμείνει αέρας. Το υγρό άζωτο, δεδομένου ότι η δεξαμενή δεν είναι αδιαβατική, θερμαίνεται σταδιακά από τη θερμότητα του περιβάλλοντος και εξατμίζεται σιγά σιγά. Οι ατμοί του αζώτου συγκεντρώνονται μαζί με τον υπάρχοντα αέρα και έτσι αυξάνεται η πίεση στη δεξαμενή. Πάνω στη δεξαμενή υπάρχουν κατάλληλες εκτονωτικές βαλβίδες Β, ώστε η πίεση να μην υπερβαίνει ποτέ τα 12 - 13 bar, για λόγους ασφαλείας. Η πίεση που αναπτύσσεται με αυτόν τον τρόπο στη δεξαμενή είναι χρήσιμη για τη λήψη με κατάλληλη πίεση υγρού αζώτου από αυτήν, ιδιαίτερα, αν πρόκειται για την τροφοδοσία αγωγών υγρού αζώτου προς καταναλώσεις. Η πίεση της δεξαμενής μετρείται με κατάλληλο μανόμετρο C. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ η λήψη υγρού αζώτου από τη δεξαμενή γίνεται με εύκαμπτο αγωγό D, ο οποίος χρησιμοποιείται για την πλήρωση μικρότερων και απλούστερων δοχείων Dewar ονομαστικής χωρητικότητας 60 ή 30 L. Η ροή του υγρού αζώτου προς τα

δοχεία ρυθμίζεται με μία βάνα ρυθμίσεως E. Για την ομαλή πλήρωση των δοχείων αυτών καλό είναι η δεξαμενή να μην έχει πίεση μεγαλύτερη από 7 bar ώστε το υγρό άζωτο να ρέει ομαλά και με μικρή λιγότερο επικίνδυνη παροχή. Αν η πίεση είναι μεγαλύτερη από τόσο, ο χρήστης μπορεί να την μειώσει εξαερίζοντας τη δεξαμενή προς το περιβάλλον από τη βαλβίδα του αγωγού πλήρωσης.

3.4.4 Μικρά δοχεία ενδιάμεσης αποθήκευσης και μεταφοράς υγρού αζώτου

Η γενική μορφή των δοχείων Dewar για την ενδιάμεση αποθήκευση και μεταφορά υγρού αζώτου διακρίνεται στην Εικόνα 3.12.



Εικόνα 3.12: Δοχείο Dewar για υγρό άζωτο σε επεξηγηματική τομή (πηγή: technifab.com)

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, τέτοια δοχεία Dewar, μικρής χωρητικότητας από 30 έως 60 L, χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά και τη μετάγγιση του υγρού αζώτου προς τους ανιχνευτές γερμανίου που χρειάζεται να ψύχονται σε χαμηλή θερμοκρασία. Στην Εικόνα 3.13 διακρίνεται το δοχείο Dewar χωρητικότητας 60 L της εταιρείας κατασκευής Air-Liquide τύπου TR-60 που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Στην Εικόνα 3.14 διακρίνεται το δοχείο Dewar χωρητικότητας 30 L της εταιρείας κατασκευής MIRION Technologies τύπου Model D-30, διαμέτρου 43 cm και ύψους 61.5 cm. Για να δοθεί μία εικόνα, ένα τέτοιο δοχείο παρουσιάζει απώλειες υγρού αζώτου περίπου 0.5 L ανά ημέρα. Τα δοχεία τοποθετούνται πάνω σε τροχοφόρες βάσεις, για να μεταφέρονται ευκολότερα.



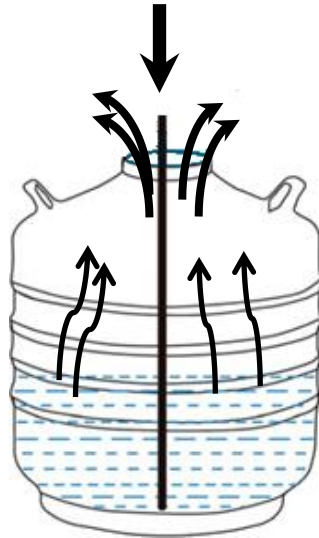
Εικόνα 3.13: Δοχείο Dewar για υγρό άζωτο χωρητικότητας 60 L



Εικόνα 3.14: Δοχείο Dewar για υγρό άζωτο χωρητικότητας 30 L

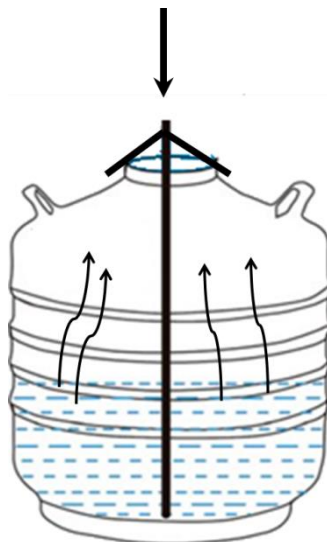
3.4.5 Εργαλεία πλήρωσης των δοχείων από τη δεξαμενή

Για την πλήρωση των δοχείων από τη δεξαμενή, ο εύκαμπος αγωγός D τοποθετείται στο δοχείο μεταφοράς όπως η μαύρη σωλήνα στο δοχείο της Εικόνας 3.15.



Εικόνα 3.15: Πλήρωση δοχείου μεταφοράς υγρού αζώτου με εύκαμπτη σωλήνα από δεξαμενή

Ως αποτέλεσμα το με πίεση εισερχόμενο υγρό άζωτο αναδύει έντονα το άζωτο, το οποίο έχει ήδη εισέρθει, με συνέπεια να δημιουργούνται κύματα (splashes), τόσο έντονα που υγρό άζωτο υπερχειλίζει, συχνά με επικίνδυνο τρόπο, από την είσοδο του δοχείου (βλ. Εικόνα 3.15). Για τον περιορισμό αυτού του φαινομένου μπορεί να ελέγχεται καλύτερα η ομαλότερη με λιγότερη πίεση ροή του αζώτου προς το δοχείο μέσω του εύκαμπτου σωλήνα. Εναλλακτικά η Air-Liquide προσφέρει σωλήνες πλήρωσης με κωνικά πώματα που σκεπάζοντας την είσοδο του δοχείου εμποδίζουν την υπερχειλίση (βλ. Εικόνα 3.16)



Εικόνα 3.16: Πλήρωση δοχείου μεταφοράς υγρού αζώτου με εύκαμπτη σωλήνα από δεξαμενή, χρησιμοποιείται κωνικό πώμα για την παρεμπόδιση της υπερχειλίσης.

Οι σωλήνες αυτοί μπορούν να συνδέονται με τον εύκαμπτο σωλήνα με κατάλληλο σύνδεσμο. Κάποιοι τύποι από τους σωλήνες αυτούς έχουν στην έξοδο ακροφύσια καταστροφής της

κινητικής ενέργειας του εισερχόμενου αζώτου. Για αυτούς τους σωλήνες πλήρωσης της Air-Liquide δίνεται η φωτογραφία της Εικόνας 3.17.



Εικόνα 3.17: Σωλήνες πλήρωσης δοχείων μεταφοράς υγρού αζώτου της εταιρείας Air-Liquide τύπου G1 (αριστερά) και G2 (δεξιά). Στις σωλήνες χρησιμοποιείται κωνικό πώμα για την παρεμπόδιση της υπερχειλίσης. Η σωλήνα αριστερά έχει ακροφύσιο καταστροφής της κινητικής ενέργειας του εισερχόμενου υγρού αζώτου.

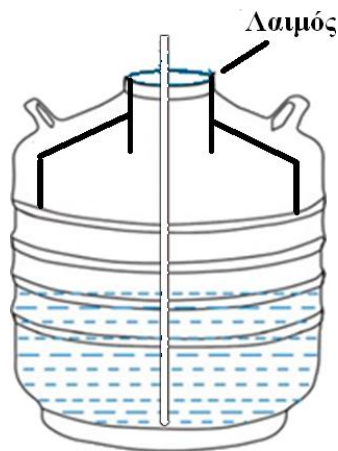
Τα πιο πάνω εργαλεία πλήρωσης παρότι βολικά παρουσιάζουν το μειονέκτημα ότι δεν παρέχουν κάποιον έλεγχο στη στάθμη του αζώτου που προκύπτει μέσα στο δοχείο μεταφοράς. Η στάθμη αυτή είναι σημαντικό να προκύπτει πάντα περίπου ίδια, τόσο για λόγους οικονομίας όσο και για τεχνικούς λόγους απαραίτητους όταν το δοχείο μεταφοράς πρέπει να αναπτύξει πίεση προκειμένου το άζωτο από αυτό να μεταγγισθεί στον τελικό προορισμό του. Για το σκοπό αυτό στο ΕΠΤ-ΕΜΠ αναπτύχθηκαν εργαλεία πλήρωσης της μορφής που διακρίνεται στην Εικόνα 3.18.



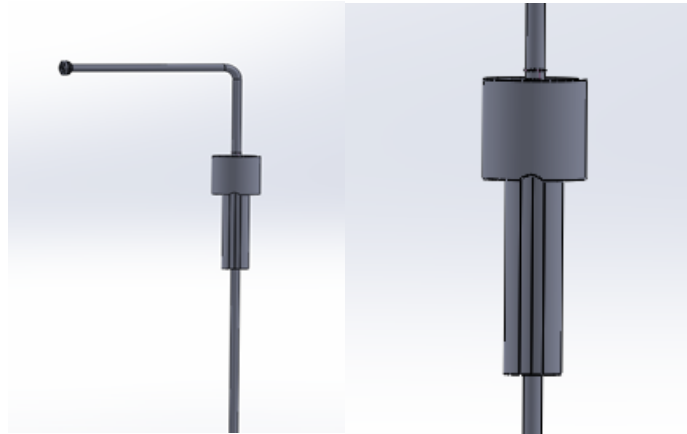
Εικόνα 3.18: Εργαλεία πλήρωσης δοχείων μεταφοράς υγρού αζώτου που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Τα εργαλεία αυτά είναι δύο, ένα για το δοχείο των 60 L και ένα για το δοχείο των 30 L. Είναι κατασκευασμένα από σωλήνα χαλκού ονομαστικής διαμέτρου $\Phi 15$ mm, η οποία έχει οριζόντιο και κατακόρυφο τμήμα. Το οριζόντιο τμήμα συνδέεται με τον εύκαμπτο σωλήνα D από τη δεξαμενή. Το κατακόρυφο τμήμα βυθίζεται στο προς πλήρωση δοχείο. Ομοιαξονικά με τον κατακόρυφο σωλήνα έχει τοποθετηθεί στεγανά και σταθερά ένα κυλινδρικό πώμα από τεφλόν. Ο σκοπός του πώματος είναι τριπλός: (α) να σταθεροποιεί την έξοδο του κατακόρυφου σωλήνα σε αρκετό βάθος μέσα στο δοχείο, (β) να εμποδίζει την υπερχειλίση του αζώτου από την είσοδο του δοχείου, και τέλος (γ) να ελέγχει τη στάθμη στην οποία το δοχείο θεωρείται ότι πληρώθηκε.

Ο έλεγχος της στάθμης γίνεται ως εξής: Το μήκος του πώματος από τεφλόν στο τμήμα που έχει τη μικρή διάμετρο είναι ίσο με το μήκος του "λαιμού" του δοχείου, όπως αυτός διακρίνεται στην Εικόνα 3.19. Όταν η στάθμη του αζώτου φθάσει στο ύψος της εισόδου του λαιμού, τότε το υγρό άζωτο αφήνεται να υπερχειλίσει από κενό που έχει επίτηδες αφαιρεθεί κατά μήκος ορισμένων λίγων γενετειρών της μικρής διαμέτρου του κυλινδρικού πώματος (βλ. και στην Εικόνα 3.20). Ο χειριστής που πληρώνει το δοχείο παρατηρεί πότε υπερχειλίζει και σταματάει την πλήρωση.



Εικόνα 3.19: Λαιμός δοχείου Dewar



Εικόνα 3.20: Κατασκευαστική λεπτομέρεια των εργαλείων πλήρωσης του ΕΠΤ-ΕΜΠ

3.4.6 Εργαλεία μετάγγισης από τα δοχεία μεταφοράς προς την τελική κατανάλωση

Υπάρχουν πολλά είδη τέτοιων εργαλείων μετάγγισης. Τα εργαλεία μετάγγισης με πίεση αέρα ή αερίου αζώτου από εξωτερική πηγή, τα εργαλεία μετάγγισης με πίεση αζώτου από το ίδιο το δοχείο και τα εργαλεία μετάγγισης με ηλεκτρική αντίσταση. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ χρησιμοποιούνται τα δύο πρώτα είδη εργαλείων, χωρίς να αποκλείεται και η χρήση του τρίτου είδους.

Το εργαλείο μετάγγισης με πίεση αέρα από εξωτερική πηγή μπορεί να είναι τόσο απλό όσο αυτό της Εικόνας 3.21

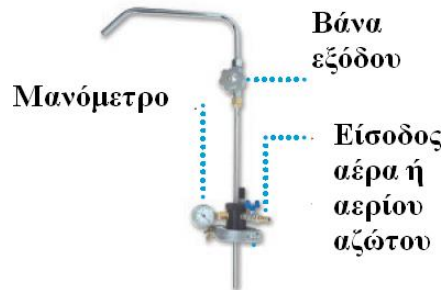


Εικόνα 3.21: Απλό εργαλείο μετάγγισης υγρού αζώτου με πίεση αέρα εταιρείας Air-Liquide (αριστερά). Παρόμοιο σύστημα της εταιρείας TIANCHI

Το εργαλείο λειτουργεί ως εξής: Ο χρήστης τοποθετεί το πώμα με τους δύο αγωγούς πάνω στην είσοδο του δοχείου. Το πώμα είναι κωνικό και ελαστικό ώστε να δημιουργεί στεγανότητα. Ο χρήστης στέλνει αέρα με πίεση στο δοχείο με την αντλία ποδιού που

διακρίνεται, μέσω του κοντού σωλήνα. Από τον μακρύ βυθισμένο στο υγρό άζωτο σωλήνα εξέρχεται από το δοχείο το επιθυμητό υγρό άζωτο.

Το εργαλείο μετάγγισης με πίεση αέρα ή αέριο άζωτο από εξωτερική πηγή μπορεί επίσης να είναι και περισσότερο πολύπλοκο, όπως αυτό της Εικόνας 3.22.



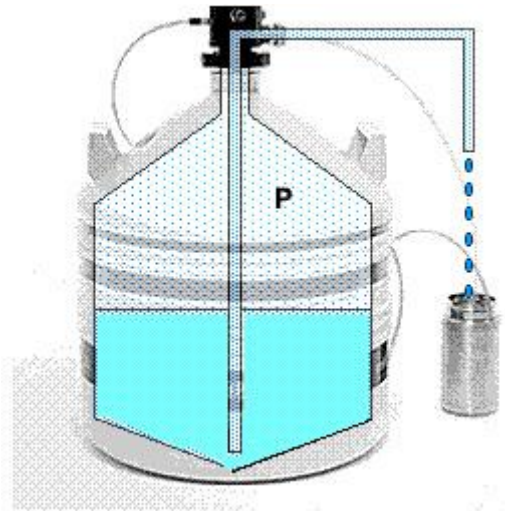
Εικόνα 3.22: Απλό εργαλείο μετάγγισης υγρού αζώτου με πίεση αέρα εταιρείας Air-Liquide τύπου PC 250

Το εργαλείο λειτουργεί ως εξής: Ο χρήστης τοποθετηθεί το εργαλείο και το ασφαλίζει στεγανά με μηχανισμό που το ίδιο το εργαλείο διαθέτει, πάνω στην είσοδο του δοχείου. Από την είσοδο δεξιά το δοχείο τροφοδοτείται με αέρα υπό πίεση ή με αέριο άζωτο υπό πίεση. Από τον μακρύ βυθισμένο στο υγρό άζωτο σωλήνα εξέρχεται από το δοχείο το επιθυμητό υγρό άζωτο.

Το εργαλείο με πίεση αζώτου από το ίδιο το δοχείο είναι ο μηχανισμός που διακρίνεται στο δοχείο της Εικόνας 3.14. Το εργαλείο λειτουργεί ως εξής: Μετά την πλήρωση του δοχείου με υγρό άζωτο μέχρι το κατάλληλο ύψος, στο άνω μέρος του δοχείου παραμένει ένας κατάλληλα μεγάλος κενός χώρος με αέρα. Ο χρήστης τοποθετεί στην είσοδο του δοχείου το εργαλείο, το οποίο είναι στην πραγματικότητα παρόμοιο με αυτό της Εικόνας 3.19. Το εργαλείο ασφαλίζει στεγανά στην είσοδο με μηχανισμό που το ίδιο διαθέτει. Στη συνέχεια, το δοχείο παραμένει ως έχει για περίπου 12 με 18 ώρες. Στο διάστημα και λόγω της εξάτμισης του υγρού αζώτου, αναπτύσσεται ικανή πίεση στον κενό όγκο του δοχείου της τάξεως του 0.5 bar (6 psi), η οποία μετράται με σχετικό μανόμετρο. Η πίεση αυτή είναι αρκετή ώστε, ανοίγοντας την κατάλληλη βάνα, το δοχείο να μπορεί να μεταγγίσει υγρό άζωτο με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που λαμβάνει κάποιος υγρό άζωτο από μια μεγάλη δεξαμενή (βλ. και την Εικόνα 3.11).

Το εργαλείο μετάγγισης με ηλεκτρική αντίσταση είναι αντίστοιχο με τα προηγούμενα και λειτουργεί ως εξής: Έστω εργαλείο μετάγγισης αζώτου όπως τα προηγούμενα, το οποίο διακρίνεται στην Εικόνα 3.23. Ο χρήστης τοποθετεί το εργαλείο στην είσοδο του δοχείου. Το εργαλείο ασφαλίζει στεγανά στην είσοδο με μηχανισμό που το ίδιο διαθέτει. Στη συνέχεια,

μία ηλεκτρική αντίσταση τυλιγμένη ελικοειδώς στον κατακόρυφο σωλήνα που βρίσκεται βυθισμένος στο υγρό άζωτο του δοχείου, τροφοδοτείται από ένα εξωτερικό τροφοδοτικό χαμηλής τάσης (έως 24 V) με κύκλωμα κατάλληλα μονωμένων αγωγών. Η ηλεκτρική αντίσταση θερμαίνει πολύ σύντομα το άζωτο, με τρόπο ώστε να εξατμίζεται και να δημιουργεί πίεση μέσα στο δοχείο. Με την πίεση αυτή επιτυγχάνεται η μετάγγιση του υγρού αζώτου στον τελικό του προορισμό. Τα εργαλεία μετάγγισης με ηλεκτρική αντίσταση που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ διακρίνονται στην Εικόνα 3.24



Εικόνα 3.23: Επίδειξη μετάγγισης υγρού αζώτου με ηλεκτρική αντίσταση (πηγή: www.cryodiffusion.com)



Εικόνα 3.24: Εργαλεία μετάγγισης με ηλεκτρική αντίσταση που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Πρόκειται για τροποποιημένα εργαλεία τύπου PC - 250 της Air-Liquide

3.5 Σχόλια και συμπεράσματα

Με βάση όσα αναφέρθηκαν και συγκρίνοντας τους θαλάμους νεφώσεως τύπου διάχυσης γίνεται κατανοητό ότι σε επίπεδο κατ' αρχάς επίδειξης ξεχωρίζουν για την απλότητα και την ευκολία συγκρότησής τους οι καθοδικοί θάλαμοι διάχυσης. Επομένως ο καθοδικός θάλαμος είναι αυτός που δοκιμάστηκε ως κατασκευή στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας. Στο θάλαμο αυτό επιδιώχθηκε να παρατηρηθούν τα συχνά και εύκολα ίχνη από -α σωματίδια, ηλεκτρόνια και δευτερογενή ηλεκτρόνια λόγω φωτονιακής ακτινοβολίας. Η ευαίσθητη περιοχή του θαλάμου αυτού του είδους είναι συγκριτικά μεγαλύτερη από άλλους και δίνεται και η δυνατότητα παρατήρησης των ιχνών από την οροφή, γεγονός που διευκολύνει την παρατήρηση. Ο θάλαμος κατασκευάστηκε ώστε να ψύχεται με υγρό άζωτο, το οποίο υπάρχει διαθέσιμο χωρίς σημαντικό κόστος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και για τη χρήση του υπάρχει σημαντική εμπειρία. Στο επόμενο Κεφάλαιο 4, περιγράφονται διάφορες απόπειρες κατασκευής και θέσης σε λειτουργία του υπόψη θαλάμου με σκοπό να εντοπισθούν σχετικές δυσκολίες και εμπόδια που προκύπτουν τόσο από τις κατασκευαστικές προσεγγίσεις όσο και από τη χρήση του υγρού αζώτου ως ψυκτικό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΘΑΛΑΜΟ ΝΕΦΩΣΕΩΣ ΤΥΠΟΥ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΨΥΧΟΜΕΝΟΥ ΜΕ ΥΓΡΟ ΑΖΩΤΟ - ΔΟΚΙΜΕΣ Α' ΦΑΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διάφορες δοκιμές με κατασκευαστικές υλοποιήσεις καθοδικού θαλάμου νεφώσεως τύπου διάχυσης με βάση τα θεωρητικά και τα κατασκευαστικά στοιχεία για θαλάμους αυτού του είδους, όπως παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια 2 και 3. Ο θάλαμος αυτού του τύπου, ο οποίος προέκυψε από την τεχνολογία που πρότεινε ο Langsdorf, προσφέρεται για δοκιμές καθώς είναι πολύ απλούστερος από εκείνον που πρότεινε ο Wilson παλαιότερα και έναντι του εξίσου απλού ανοδικού θαλάμου επιτρέπει την ευκολότερη παρατήρηση των ιχνών. Οι κατασκευαστικές αυτές υλοποιήσεις δεν διεκδικούν την ποιότητα που έχουν διάφοροι έτοιμοι θάλαμοι νεφώσεως του ίδιου ή παρόμοιων τύπων, όπως αυτοί κατασκευάζονται και διατίθενται εμπορικά, πραγματοποιήθηκαν όμως κυρίως για να αναδειχθούν τα προβλήματα που μπορούν να παρουσιάζουν τέτοιες κατασκευές και μάλιστα κατασκευές που ψύχονται με υγρό άζωτο. Ο στόχος ήταν να προκύψει ένας θάλαμος δια του οποίου θα μπορεί με απλό τρόπο να βοηθηθούν τα εργαστηριακά μαθήματα που αφορούν στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες, τα οποία προσφέρονται σε προπτυχιακό επίπεδο από το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Προϋποθέσεις για τις δοκιμαστικές κατασκευές ήταν ασφαλώς και το μικρό κόστος και η ευκολία συγκρότησης της διάταξης με απλά μέσα, τα οποία μπορεί να διατίθενται σε ένα ερασιτεχνικό περιβάλλον. Οδηγίες για τις δοκιμαστικές κατασκευές αντλήθηκαν ασφαλώς από τα προηγούμενα Κεφάλαια, αλλά και από διάφορες πηγές του διαδικτύου, τόσο από διαδικτυακά κείμενα, όσο και από οπτικοακουστικές επιδείξεις (βίντεο στα διάφορα διαδικτυακά "tubes"). Οι απαιτήσεις που έπρεπε να ικανοποιηθούν στις δοκιμές ήταν αρκετές. Χαρακτηριστικά αναφέρονται ως σημαντικότερες: (i) η ψύξη του ψυχόμενου δαπέδου στην κατάλληλη θερμοκρασία, (ii) η γεωμετρία και οι διαστάσεις του θαλάμου, (iii) τα υλικά κατασκευής σε συνδυασμό με τα αναγκαία διαφανή παράθυρα για παρατηρήσεις, (iv) ο κατάλληλος φωτισμός μαζί με τις κατάλληλες συνθήκες υψηλής αντίθεσης, (v) το είδος θερμού ατμού προς διάχυση σε αέρα υπό ατμοσφαιρική πίεση σε κατάλληλο πεδίο θερμοκρασίας, όλα αυτά δηλαδή που είναι προϋποθέσεις για ποιοτικές οπτικές και φωτογραφικές παρατηρήσεις των ιχνών. Στο Κεφάλαιο που ακολουθεί αναλύονται περισσότερο τα χαρακτηριστικά και οι τεχνικές απαιτήσεις για έναν όσο το δυνατό πιο απλό

καθοδικό θάλαμο νεφώσεως τύπου διάχυσης, παρουσιάζονται οι κατασκευαστικές υλοποιήσεις που δοκιμάστηκαν και εξάγεται μια πρώτη ομάδα συμπερασμάτων.

4.2 Βασικές τεχνικές απαιτήσεις καθοδικού θαλάμου

Ακολουθεί μία συνοπτική ανάλυση για τα βασικότερες προϋποθέσεις ώστε να κατασκευαστεί θάλαμος που να λειτουργεί.

(α) Απαιτήσεις ψύξεως

Στους καθοδικούς θαλάμους η ψυχόμενη επιφάνεια είναι το δάπεδο. Το δάπεδο πρέπει συγχρόνως να ψύχεται και να διατηρείται κατά το δυνατόν χωρίς πάγο (από τη συμπύκνωση υγρασίας) για να μην εμποδίζεται ούτε η ψύξη ούτε οι οπτικές ή φωτογραφικές παρατηρήσεις των ιχνών από τυχόν παγωμένες λευκές επιφάνειες που καταστρέφουν την αντίθεση. Μετά από αρκετό χρόνο λειτουργίας (ώρα ή ώρες) είναι δυνατόν να παρατηρούνται στο ψυχόμενο δάπεδο συμπυκνώματα του θερμού ατμού (υγρή αιθανόλη ή μεθανόλη κτλ). Τυχόν τέτοια συμπυκνώματα θα πρέπει, αν είναι σε μεγάλη περίπτωση, να στραγγίζονται από το ψυχόμενο δάπεδο με κατάλληλη αποχέτευση. Αν πάλι δεν είναι σε μεγάλη ποσότητα, αυτά τα συμπυκνώματα είναι χρήσιμα διότι εμποδίζουν το σχηματισμό πάγου στο ψυχόμενο δάπεδο. Για την αποστράγγιση αυτών των συμπυκνωμάτων μπορεί το ψυχόμενο δάπεδο να καλυφθεί από μαύρο ύφασμα (βελούδο ή τσόχα) που να τα απορροφά. Το μαύρο χρώμα του υφάσματος είναι κατάλληλο για να δημιουργηθεί η αναγκαία αντίθεση για την παρατήρηση των ιχνών, τα οποία ως συμπυκνώσεις έχουν υπόλευκο χρώμα.

(β) Απαιτήσεις γεωμετρίας

Το ύψος του θαλάμου δεν χρειάζεται να είναι πολύ μεγάλο δεδομένου ότι η ευαίσθητη περιοχή, αν επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες, μπορεί να είναι μεγάλου ύψους αρκετών εκατοστών. Επομένως, σύμφωνα και με τα όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3, το ύψος μπορεί να είναι στην περιοχή από περίπου 15 cm έως περίπου 20 cm. Οι κατά πλάτος και κατά μήκος διαστάσεις, αν είναι μικρές, πιθανόν να εμποδίσουν τον σχηματισμό ιχνών από ηλεκτρόνια μεγάλης κινητικής ενέργειας, αλλά όχι αυτών από -α σωματίδια. Ένας καλός κανόνας είναι το πλάτος και το μήκος του θαλάμου να είναι κοντά στο ύψος του. Επιπλέον, αν οι διαστάσεις του θαλάμου είναι μικρές πιθανόν η φωτογράφιση των φαινομένων από την οροφή ή από τις πλευρές να δυσκολέψει αν ο φακός της φωτογραφικής συσκευής δεν είναι κατάλληλος για μικρές εστιακές αποστάσεις.

(β) Υλικά κατασκευής, απαιτήσεις αντοχής και ορατότητας

Τα υλικά των τοιχωμάτων του θαλάμου θα πρέπει να επιτρέπουν τον όσο το δυνατόν πιο εύκολο και από πολλές γωνίες φωτισμό του από εξωτερική πηγή φωτός. Αυτό επιτρέπει την εύκολη και από πολλές γωνίες οπτική ή φωτογραφική παρατήρηση. Καλό είναι επομένως όλα τα τοιχώματα να είναι διαφανή ώστε οι επιλογές να αυξάνονται. Επίσης τα τοιχώματα πρέπει να παρουσιάζουν μηχανική αντοχή και αντοχή στη θερμική καταπόνηση λόγω της αναγκαίας βαθμίδας μείωσης θερμοκρασίας μεταξύ θερμής οροφής (~20 °C) και ψυχόμενου δαπέδου. Αν για την ψύξη χρησιμοποιείται υγρό άζωτο, τότε η βαθμίδα αυτή μπορεί να ξεπεράσει τους -210 °C. Κατάλληλα υλικά μπορεί επομένως να είναι το πυράντοχο διαφανές γυαλί ή και το διαφανές Plexiglass (ή με την ισοδύναμη ονομασία Perspex). Το πάχος του γυαλιού ή του Plexiglass πρέπει να είναι αρκετό ώστε να εξασφαλίζεται η ζητούμενη μηχανική και θερμική αντοχή της κατασκευής. Για το Plexiglass μπορεί να θεωρηθεί ότι ένα τέτοιο καλό πάχος είναι μεταξύ 8 και 10 mm. Αν τα υλικά κατασκευής είναι διαφανή, τα ίχνη μπορούν να παρατηρηθούν (και αν οι διαστάσεις του θαλάμου συμφωνούν με τις δυνατότητες της φωτογραφικής μηχανής, να φωτογραφηθούν) εύκολα από τις πλευρές του θαλάμου ή από την οροφή του. Για την επίτευξη αντίθεσης θα πρέπει απέναντι από τη γραμμή θέασης να υπάρχει κατάλληλη πηγή φωτός. Επιπλέον, για τον ίδιο σκοπό θα πρέπει το δάπεδο του θαλάμου να είναι μαύρου χρώματος. Αυτό μπορεί να επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του χρώματος του ίδιου του υλικού του δαπέδου ή με μαύρο χρώμα ή με επικάλυψη με μαύρο φύλλο ή, όπως έχει ήδη αναφερθεί, με μαύρο ύφασμα.

(γ) Απαιτήσεις πηγής φωτός

Για τις οπτικές και φωτογραφικές παρατηρήσεις με τον θάλαμο, συνιστάται η χρήση του σε υποφωτισμένο περιβάλλον, ώστε ο ειδικός και έντονος φωτισμός προς τον θάλαμο να μην παρενοχλείται από το διάχυτο φωτισμό του περιβάλλοντος. Με αυτήν την προϋπόθεση, ο κατάλληλος φωτισμός για τον θάλαμο πρέπει να έχει τη σχετικά μεγάλη ένταση ενός συμβατικού προβολέα διαφανειών (στην ουσία τέτοιοι προβολείς είναι σήμερα πολύ λίγοι) ή ενός βιντεοπροβολέα. Το μειονέκτημα αυτών των πηγών φωτός, οι οποίες λειτουργούν με λαμπτήρες υδραργύρου, είναι ότι αν φωτίσουν επί πολύ, θερμαίνουν το μίγμα ατμού - αερίου και καταστρέφουν την αναγκαία για τη λειτουργία του θαλάμου βαθμίδα μείωσης θερμοκρασίας. Εναλλακτικά, σήμερα υπάρχουν και συστοιχίες led με την ίδια φωτεινότητα, οι οποίες δεν θερμαίνουν τον θάλαμο. Η πηγή πρέπει να φωτίζει καλά την ευαίσθητη περιοχή του θαλάμου, η οποία είναι συνήθως κοντά στο ψυχόμενο δάπεδο. Αν η πηγή φωτός έχει μεγάλη επιφάνεια και το φως της φωτίζει σημαντικό όγκο του θαλάμου τότε μπορεί να

χρησιμοποιείται ένα διάφραγμα για να περιορίσει τη διατομή της εκπομπής. Το φάσμα ενεργειών των φωτονίων της πηγής φωτός θα πρέπει να μην έχει σημαντικό υπέρυθρο και ιώδες - υπεριώδες τμήμα. Το υπέρυθρο τμήμα, αν υπάρχει, θερμαίνει ανεπιθύμητα το θάλαμο, ενώ το ιώδες - υπεριώδες τμήμα μπορεί να ionίσει τον ατμό δημιουργώντας ηλεκτρόνια, τα οποία παίζουν το ρόλο πυρήνων συμπυκνώσεως και δημιουργούν ίχνη τα οποία δεν οφείλονται σε ionτίζουσες ακτινοβολίες. Σε περίπτωση σημαντικού ιώδους - υπεριώδους τμήματος είναι δυνατόν να δημιουργείται στο θάλαμο διάχυτη βροχή. Ο περιορισμός του ιώδους - υπεριώδους τμήματος γίνεται συνήθως με κατάλληλα φίλτρα.

(δ) Απαιτήσεις για το μίγμα ατμών - αερίου

Υπάρχει ο περιορισμός ότι η πυκνότητα του ατμού πρέπει να είναι μικρότερη από την πυκνότητα του αερίου. Σε έναν απλό καθοδικό θάλαμο το αέριο δεν μπορεί να είναι άλλο από τον αέρα, καθώς οτιδήποτε άλλο θα δημιουργούσε σοβαρές κατασκευαστικές πολυπλοκότητες. Ικανοποιητικοί ατμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με αέρα είναι γενικά οι ατμοί αλκοολών. Πιο συγκεκριμένα συνήθως για παραγωγή ατμών χρησιμοποιείται η αιθανόλη (το γνωστό μας καθαρό οινόπνευμα), η μεθανόλη και η ισοπροπυλική αλκοόλη. Μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις, για παραγωγή ατμών οι αλκοόλες αυτές αναμιγνύονται με κάποιο ποσοστό νερού περίπου 5% . Στους θαλάμους που ψύχονται με ξηρό πάγο μπορεί γενικά να χρησιμοποιείται οποιαδήποτε από αυτές τις αλκοόλες. Δεδομένου ότι η ψύξη με υγρό άζωτο είναι σχετικά σπάνια, αναφέρεται χωρίς αποδείξεις ότι σε αυτή την περίπτωση, καλύτερο είναι να χρησιμοποιείται αιθανόλη, καθόσον το σημείο βρασμού του υγρού αζώτου είναι $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ και το σημείο πήξεως αιθανόλης είναι στους $-114.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, πολύ χαμηλότερο από το σημείο πήξεως της μεθανόλης ($-97.6\text{ }^{\circ}\text{C}$) ή της ισοπροπυλικής αλκοόλης ($-89\text{ }^{\circ}\text{C}$). Το πόση αλκοόλη θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τον όγκο του θαλάμου και το χρόνο λειτουργίας του. Εμμέσως προκύπτει από τους μικρούς καθοδικούς θαλάμους της CloudChambersDotCom ότι μία τυπική τιμή μπορεί να είναι 25 mL ανά λίτρο θαλάμου ανά ώρα. Οι θάλαμοι της CloudChambersDotCom εξετάζονται πιο λεπτομερώς σε επόμενη ενότητα.

(ε) Συνέπειες πίεσης

Η πίεση στην οποία προορίζεται να λειτουργήσει ένας καθοδικός θάλαμος νεφώσεως έχει ασφαλώς επίδραση στη λειτουργία του. Παρόλα αυτά στη διερεύνηση που έγινε σε αυτήν τη Διπλωματική Εργασία δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοσθεί άλλη πίεση πέραν της ατμοσφαιρικής, διότι σε άλλη περίπτωση ελέγχου και ρύθμισης της πίεσης θα

δημιουργούνται ανάγκες πολυπλοκότερης κατασκευής. Η χρησιμοποίηση της ατμοσφαιρικής πίεσης παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Αναφέρονται τα εξής χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα: (i) Τυχόν μικρές διαρροές ατμού ή μίγματος ατμού - αερίου δεν ενισχύονται λόγω διαφορών πίεσεως, (ii) Τα διαφανή τμήματα μπορεί να είναι μικρού πάχους και μεγάλης επιφάνειας χωρίς κίνδυνο θραύσεως, (iii) Πηγές ραδιενέργειας μπορούν να εισάγονται στο θάλαμο μέσω μικρών ανοιγμάτων που ανοίγουν και σφραγίζονται εύκολα χωρίς να διαταράσσεται το μίγμα ατμού - αερίου και ιδιαίτερα η ευαίσθητη περιοχή.

(στ) Συνέπειες θερμοκρασιακού πεδίου

Η μεγάλη βαθμίδα μείωσης θερμοκρασίας σε έναν καθοδικό θάλαμο επιβάλλει τη μόνιμη κατάσταση μεταφοράς θερμότητας στο μίγμα ατμών - αερίου του θαλάμου. Λόγω της βαθμίδας ο θάλαμος, στον οποίο εξελίσσεται με τον επιθυμητό τρόπο η διάχυση του θερμού ατμού στον αέρα, είναι ένας χώρος όπου η θερμότητα μεταφέρεται κυρίως λόγω αγωγής και τυχόν φαινόμενα συναγωγής είναι αμελητέα ή έστω μικρής σημασίας. Βεβαίως η συναγωγή, παρότι ανεπιθύμητη, δεν μπορεί να εμποδιστεί εντελώς. Υπάρχουν μάλιστα αιτίες που την προάγουν, όπως π.χ.: (i) Η θέρμανση από την πηγή φωτός, (ii) Οι οριακές συνθήκες θερμοκρασίας που επικρατούν στα τοιχώματα, ιδιαίτερα όταν το εξωτερικό θερμοκρασιακό πεδίο είναι πολύ διαφορετικό από αυτό του θαλάμου και τα τοιχώματα δεν είναι αδιαβατικά (π.χ. όταν είναι μεταλλικά). Αυτά τα φαινόμενα φυσικά είναι πολύ μικρότερης σημασίας αν τα τοιχώματα είναι από κάποιο πλαστικό υλικό κατάλληλου πάχους. (iii) Η αναλογία ύψους - πλάτους (μήκους) του θαλάμου, όσο μικρότερη (από 1:2 έως 1:4), τόσο καλύτερα. Οποσδήποτε αυτή η προϋπόθεση είναι δύσκολο να τηρηθεί ιδιαίτερα όταν επιδιώκεται κάτι που είναι μικρότερο από 1:1 διότι συνεπάγεται ένα ψυχόμενο δάπεδο σχετικά μεγάλης επιφάνειας και άρα τεχνικά δυσκολότερο.

(ζ) Ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο

Το ηλεκτρικό ή/και το μαγνητικό πεδίο, παρόλο που προσθέτουν δυνατότητες καλύτερης παρατήρησης σε ένα θάλαμο νεφώσεως τύπου διάχυσης, δεν θεωρούνται απαραίτητα για έναν απλό καθοδικό θάλαμο όπως αυτός που επιδιώκεται στο πλαίσιο αυτής της Διπλωματικής Εργασίας. Βεβαίως όταν προκύψει ένας θάλαμος ο οποίος λειτουργεί περίπου όπως αναμένεται, μπορεί να προστεθούν τέτοια πεδία. Ευκολότερο είναι να προστεθεί ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο μπορεί να αναπτυχθεί και εξωτερικά του θαλάμου.

4.3 Ψυχόμενα δάπεδα για τις δοκιμές

Για τις δοκιμές ετοιμάσθηκαν δύο κύριες διατάξεις για την ψύξη του δαπέδου: μία με ξηρό πάγο και μία με υγρό άζωτο. Η διάταξη για τον ξηρό πάγο ετοιμάσθηκε ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν υπάρχει διαθέσιμος ξηρός πάγος ενώ η διάταξη για το υγρό άζωτο ετοιμάσθηκε για να χρησιμοποιηθεί για την τεχνική ψύξεως που διερευνάται σε αυτήν την Διπλωματική Εργασία. Στο πλαίσιο των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν και άλλες απλούστερες διατάξεις για ψύξη με υγρό άζωτο προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σε πιο σύντομο χρόνο.

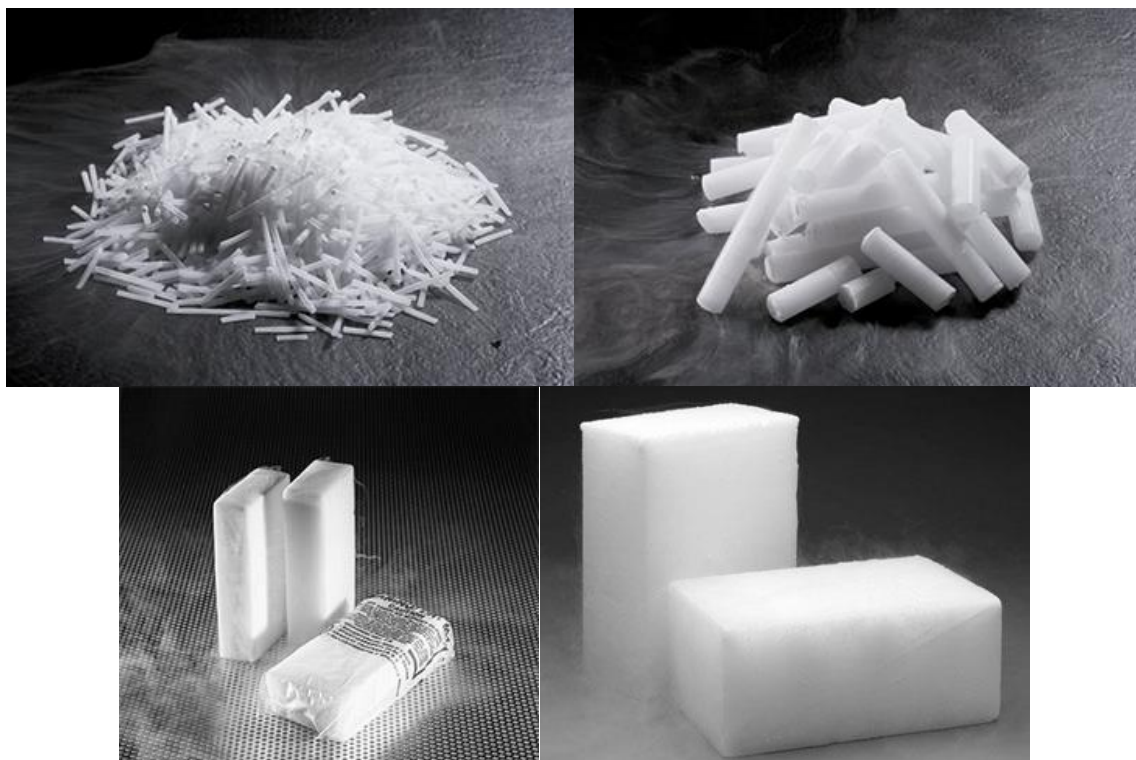
4.3.1 Ψύξη με ξηρό πάγο

Η διάταξη ψύξης δαπέδου με ξηρό πάγο συγκροτήθηκε χωρίς συγκεκριμένο σχέδιο, απλώς για να καλύψει την απαίτηση ψύξης μιας μεταλλικής επιφάνειας μικρού εμβαδού. Για το σκοπό αυτό κατασκευάσθηκε ένα ξύλινο δοχείο από MDF. Οι εσωτερικές διαστάσεις του δοχείου είναι 39×34×7 cm, κατάλληλες για να υποδέχεται ξηρό πάγο. Το δοχείο αυτό διακρίνεται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: Ξύλινο δοχείο για υποδοχή ξηρού πάγου

Η εξάχνωση του ξηρού πάγου δεν αφήνει υπολείμματα ή υγρασία, επομένως το ξύλινο δοχείο είναι κατάλληλο για τη χρήση αυτή. Επιπλέον λόγω των καλών μονωτικών ιδιοτήτων του ξύλου, το δοχείο συμβάλλει στο να διατηρείται ο ξηρός πάγος περισσότερο. Παρόλα αυτά παρατηρούνται στο δοχείο συμπυκνώματα υγρασίας από τον αέρα της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας. Ο ξηρός πάγος διατίθεται στην Αττική από διάφορους κατασκευαστές στον ίδιο ή όμορους νομούς, σε δύο - τρεις κύριες μορφές: κυλινδρικοί διαμέτρου 3 mm, κυλινδρικοί διαμέτρου 16 mm, πλάκες και "τούβλα" (βλ. και την Εικόνα 4.2).



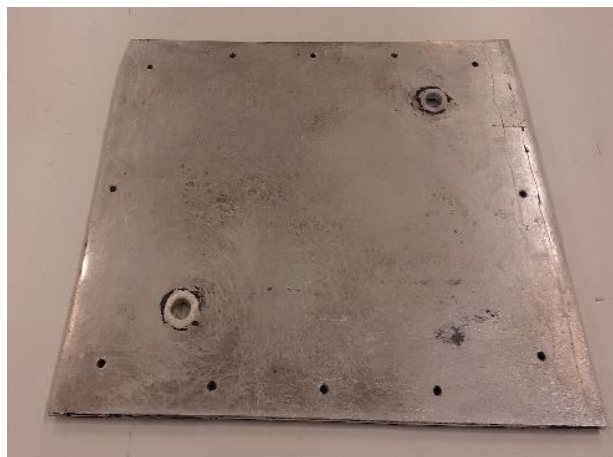
Εικόνα 4.2: Διάφορες βιομηχανικές μορφές ξηρού πάγου. Άνω αριστερά: κυλινδρίσκοι 3 mm, Άνω δεξιά: κυλινδρίσκοι 16 mm, Κάτω αριστερά: πλάκες, Κάτω δεξιά: τούβλα (φωτογραφίες από το διαδίκτυο)

Το υλικό αυτό, επειδή δεν είναι αποθηκεύσιμο προμηθεύεται μόνο κατόπιν παραγγελίας και συνήθως υπάρχει κατώτερο όριο ποσότητας που μπορεί να παραγγελθεί. Η διακίνηση του ξηρού πάγου στον προορισμό του γίνεται σε μονωμένα δοχεία από φελιζόλ, ώστε να διατηρείται όσο το δυνατόν περισσότερο. Με το υλικό αυτό μπορεί να γεμίσει το δοχείο που κατασκευάστηκε, με σκοπό να δημιουργηθεί μια επίπεδη επιφάνεια από ξηρό πάγο. Πάνω στην επιφάνεια αυτή μπορεί να τοποθετηθεί το ψυχόμενο δάπεδο από μεταλλική λαμαρίνα. Η λαμαρίνα πρέπει να έχει διαστάσεις μικρότερες από το εμβαδόν του δοχείου, ώστε με την εξάχνωση του ξηρού πάγου να βυθίζεται στο δοχείο χωρίς να χάνει την επαφή της με τον ξηρό πάγο, μέχρι ο πάγος να εξαντληθεί. Για το χειρισμό του ξηρού πάγου πρέπει να λαμβάνονται προφυλάξεις έναντι κρυοπαγημάτων, να χρησιμοποιούνται δηλαδή κατάλληλα γάντια ψύχους. Επιπλέον, ο χώρος χρήσης του ξηρού πάγου πρέπει να αερίζεται καλά διότι η εξάχνωσή του δημιουργεί διοξείδιο του άνθρακα σε αέρια μορφή, το οποίο σε μεγάλες συγκεντρώσεις δημιουργεί κίνδυνο για τη ζωή.

4.3.2 Ψύξη με υγρό άζωτο

Με βάση όσα αναφέρθηκαν και στα προηγούμενα Κεφάλαια, η ψύξη του ψυχόμενου δαπέδου με κάποιο υγρό χαμηλής θερμοκρασίας είναι συνήθης πρακτική για τους καθοδικούς

θαλάμους νεφώσεως τύπου διαχύσεως. Για το σκοπό αυτό το ψυκτικό υγρό ρέει κάτω από το ψυχόμενο πληρώνοντας ένα χώρο μικρού ύψους και εμβαδού όσο το ψυχόμενο δάπεδο. Το ιξώδες του ψυκτικού υγρού πρέπει να είναι χαμηλό ώστε να μην εμποδίζεται η ελεύθερη ροή. Ο χώρος κάτω από το ψυχόμενο δάπεδο πρέπει να είναι πλήρης από ψυκτικό υγρό ώστε το πεδίο θερμοκρασιών στην επιφάνεια του ψυκτικού δαπέδου να είναι ομοιόμορφο. Ένα ανομοιόμορφο πεδίο θερμοκρασιών στο ψυχόμενο δάπεδο ή μία θερμοκρασία του ψυχόμενου δαπέδου που μεταβάλλεται με το χρόνο εμποδίζει τη διάχυση των ατμών και τη δημιουργία νέφους που να μπορεί να δώσει ίχνη συμπυκνώσεως. Η πίεση του ψυκτικού υγρού πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην παραμορφώνεται το ψυχόμενο δάπεδο, ούτε να υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του χώρου πλήρωσης, ούτε ακόμα περισσότερο να υπάρχει κίνδυνος διαρροών. Η διάταξη ψύξης δαπέδου με υγρό άζωτο συγκροτήθηκε με αυτές τις αρχές ως εξής: (α) Το υγρό άζωτο είναι ψυκτικό χαμηλού ιξώδους σταθερής χαμηλής θερμοκρασίας. (β) Το ψυχόμενο δάπεδο επιλέχθηκε να είναι λαμαρίνα αλουμινίου πάχους 4 mm διαστάσεων 36×30 cm (βλ. Εικόνα 4.3). (γ) Στη λαμαρίνα διανοίχθηκαν δύο οπές στις οποίες τοποθετήθηκαν κατάλληλα ακροφύσια: ένα για την είσοδο του υγρού αζώτου στην κάτω αριστερή γωνία και ένα για την έξοδο στην άνω δεξιά γωνία (βλ. Εικόνα 4.4). Τα ακροφύσια στεγανώθηκαν στη θέση τους με διαφανή σιλικόνη. (δ) Επιδιώχθηκε ώστε η έξοδος προς το ακροφύσιο εξόδου να γίνεται όσο το δυνατόν κοντύτερα στην κάτω επιφάνεια του ψυχόμενου δαπέδου, ώστε να επιτυγχάνεται ο καλός πλημμυρισμός του χώρου κάτω από το ψυχόμενο δάπεδο (βλ. Εικόνα 4.5),



Εικόνα 4.3: Λαμαρίνα αλουμινίου για το ψυχόμενο δάπεδο



Εικόνα 4.4: Το ψυχόμενο δάπεδο από αλουμίνιο με τα ακροφύσια εισόδου (κάτω αριστερά) και εξόδου (άνω δεξιά) του υγρού αζώτου



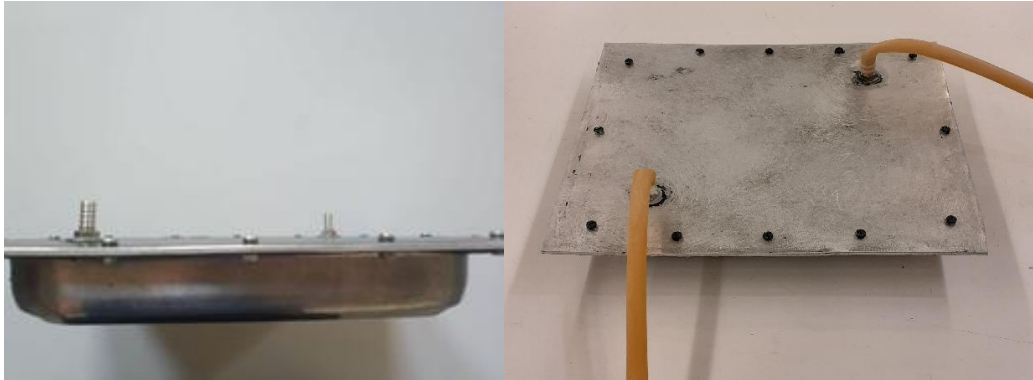
Εικόνα 4.5: Λεπτομέρεια από το πίσω μέρος του ακροφυσίου εξόδου του υγρού αζώτου. Η οπή κοντά στην πίσω επιφάνεια του ψυχόμενου δαπέδου εξασφαλίζει κατά το δυνατόν ότι το άζωτο εξέρχεται όταν πλέον έχει πλημμυρίσει το δοχείο.

(ε) Η λαμαρίνα στερεώθηκε στεγανά σε ένα μικρό ανοξείδωτο ταγί με πλατιές παρειές αντίστοιχου εμβαδού και μικρού βάθους, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει ως ο χώρος που πλημμυρίζει με υγρό άζωτο (βλ. Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6: Ανοξείδωτο ταγί με πλατιές παρειές ως δοχείο αζώτου για το ψυχόμενο δάπεδο.

Η στεγάνωση επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας αυτοκόλλητη μονωτική ταινία τύπου armaflex που επικολλήθηκε στις παρειές, όπως στην Εικόνα 4.6. Η επιφάνεια της μονωτικής ταινίας και τυχόν κενά καλύφθηκαν από ένα λεπτό στρώμα διαφανούς σιλικόνης. Τέλος στο ταψί στερεώθηκε με βίδες η λαμαρίνα από αλουμίνιο που προορίστηκε για ψυχόμενο δάπεδο (βλ. Εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.7: Το ψυχόμενο δάπεδο τοποθετημένο στεγανά πάνω στο δοχείο υγρού αζώτου.

Η ψύξη του δαπέδου λειτουργεί ως εξής: (i) Στο ταψί με τη λαμαρίνα δίνεται μία μικρή προς τα πάνω κλίση στη γωνία που βρίσκεται το ακροφύσιο εξόδου. Αυτό βοηθά ώστε ο χώρος κάτω από το ψυχόμενο δάπεδο να γεμίσει πλήρως με υγρό άζωτο. (ii) Το υγρό άζωτο προερχόμενο από ένα από τα δοχεία μεταφοράς του ΕΠΤ-ΕΜΠ γεμίζει το χώρο κάτω από το ψυχόμενο δάπεδο εισερχόμενο από το ακροφύσιο εισόδου. Η σύνδεση του ακροφυσίου εισόδου με την έξοδο του δοχείου μεταφοράς γίνεται με μία κατάλληλη σωλήνα από latex. (iii) Όταν ο χώρος γεμίσει με υγρό άζωτο, αυτό που περισσεύει εξέρχεται από το ακροφύσιο εξόδου και απορρίπτεται στο περιβάλλον με κατάλληλη σωλήνα latex. Λίγο μετά από αυτό το στάδιο το ψυχόμενο δάπεδο αποκτά την κατώτατη θερμοκρασία του κοντά στους $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η θερμοκρασία αυτή μπορεί να παρατηρηθεί με θερμοστοιχείο και κατάλληλο βολτόμετρο. (iv) Διακόπτεται η ροή του αζώτου και επαναλαμβάνεται περιοδικά όταν χρειάζεται για την ομαλή διατήρηση του νέφους στη ευαίσθητη περιοχή.

Σημειώνεται τέλος ότι η ψύξη με υγρό άζωτο δεν συνηθίζεται, οι περισσότεροι καθοδικοί θάλαμοι ψύχονται με ξηρό πάγο. Υπάρχουν βέβαια αναφορές στη βιβλιογραφία και για αυτόν τον τρόπο ψύξης, βλ. για παράδειγμα Zeze (2012), Clark (2019).

4.4 Άλλες προβλέψεις εκτός από τον θάλαμο

4.4.1 Πηγή φωτός και χώρος παρατηρήσεων

Ως πηγή φωτός χρησιμοποιείται ένας παλιός προβολέας διαφανειών που υπήρχε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, τύπου PAXIMAT MULTIMAG SC 668 / SC 669 εταιρείας κατασκευής BRAUN PHOTO TECHNIK (βλ. και Εικόνα 4.8). Οι οπτικές παρατηρήσεις στις δοκιμές έγιναν στο χώρο που χρησιμοποιείται ως σκοτεινός θάλαμος για την εμφάνιση των φιλμ βιομηχανικής ραδιογραφίας της εγκατάστασης βιομηχανικής ραδιογραφίας που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Ο χώρος δεν έχει φυσικό φωτισμό και η ένταση του φωτός στο εσωτερικό του μπορεί να ρυθμίζεται σε διακριτά βήματα περίπου ως (α) πλήρως φωτισμένος, (β) υποφωτισμένος 1, (γ) υποφωτισμένος 2, και (δ) σκοτεινός με μόνες πηγές φωτός υπέρυθρους λαμπτήρες μικρής ισχύος (βλ. και τα όσα αναφέρονται στην Μεταπτυχιακή Εργασία Χρυσικόπουλος, 2009). Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε ο φωτισμός (γ) ή καλύτερα ο φωτισμός (δ).



Εικόνα 4.8: Παλιός προβολέας διαφανειών της BROWN PHOTO TECHNIK ως πηγή φωτός

4.4.2 Πηγές ιοντίζουσας ακτινοβολίας

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ διατίθενται ασφαλώς αρκετές πηγές μικρής ραδιενέργειας, οι οποίες εκπέμπουν α σωματίδια ή ηλεκτρόνια. Πιο πρόσφορη για τις δοκιμές είναι πηγή στροντίου-90 (με χρόνο ημιζωής ~29 έτη), το οποίο διασπάται προς ύτριο-90 (με χρόνο ημιζωής ~64 ώρες) με εκπομπή ηλεκτρονίου, που με τη σειρά του διασπάται προς ζirkόνιο-90, πάλι με εκπομπή ηλεκτρονίου. Άλλη κατάλληλη πηγή είναι π.χ. το ράδιο-226, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιείται ως πηγή φωτονίων από το εξωτερικό του θαλάμου. Τα φωτόνια της πηγής εισερχόμενα στο θάλαμο σκεδάζονται με το μίγμα ατμών - αερίου και παράγουν ηλεκτρόνια, τα οποία, όπως έχει αναφερθεί αρκετές φορές, μπορούν να λειτουργήσουν ως πυρήνες συμπυκνώσεως. Ως πηγή α σωματιδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο πηγές του ΕΠΤ-ΕΜΠ αλλά και αντικείμενα από το εμπόριο που περιέχουν φυσικό θόριο-232. Ένα τέτοιο αντικείμενο είναι τα ηλεκτρόδια συγκόλλησης TIG τύπου βολφραμίου - θορίου 2% (τα

λεγόμενα "κόκκινα", επειδή έχουν κόκκινη σήμανση), τα οποία και αγοράστηκαν ώστε να είναι διαθέσιμα ως πολύ ασθενείς πηγές -α σωματιδίων κατάλληλες για επίδειξη. Η διάμετρος των ηλεκτροδίων που αγοράστηκαν είναι 3.2 mm (ή 1/8"). Τα ηλεκτρόδια αυτά παρόλο που περιέχουν λίγο θόριο-232 δεν είναι επικίνδυνα για την υγεία.

4.5 Θάλαμος ανίχνευσης

4.5.1 Θάλαμος Α (Ετοιμη λύση)

Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα πιο πάνω, γίνεται κατανοητό ότι ως καθοδικός θάλαμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και ένα φαγητοδοχείο από πλαστικό ή γυαλί κατάλληλου ύψους και κατάλληλης διατομής. Το φαγητοδοχείο πρέπει ασφαλώς να έχει διαφανείς επιφάνειες για να διευκολύνεται η παρατήρηση. Τέτοια δοχεία υπάρχουν πολλά διαθέσιμα στο εμπόριο. Για τις δοκιμές επιλέχθηκε το δοχείο από ακρυλικό πλαστικό της Εικόνας 4.9. Το ύψος του δοχείου αυτού ήταν 13 cm, το πλάτος ήταν 18 cm, ενώ το μήκος ήταν 25 cm. Ως θερμή οροφή επιλέχθηκε το πάτωμα του δοχείου. Στο εσωτερικό της θερμής οροφής τοποθετήθηκε τσόχα, η οποία, για τα πειράματα, διαβρέχθηκε με αιθανόλη ώστε να λειτουργεί ως επιφάνεια παραγωγής ατμού προς διάχυση (βλ. Εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.9: Φαγητοδοχείο από ακρυλικό πλαστικό. Στο εσωτερικό της οροφής διακρίνεται ύφασμα - τσόχα.

Το άνοιγμα του δοχείου τοποθετήθηκε στο ψυχόμενο δάπεδο. Το προφανές πλεονέκτημα της λύσης αυτής είναι ότι τέτοια δοχεία είναι άμεσα διαθέσιμα και δεν χρειάζεται κάποια κατασκευή, για αυτό εξάλλου συστήνονται ως θάλαμοι για παρατηρήσεις επίδειξης σχολικού επιπέδου, συνήθως για μόνια της κοσμικής ακτινοβολίας (βλ. και αρκετές διαδικτυακές αναφορές και διαδικτυακά βίντεο που προκύπτουν από την αναζήτηση "cloud chamber"). Τα μειονεκτήματα της λύσης αυτής έχουν ως εξής: (α) Το δοχείο δεν έχει ορατότητα μέσω της οροφής, παρά μόνο μέσα από τα πλάγια τοιχώματα, (β) Τα τοιχώματα του δοχείου είναι

αρκετά λεπτά με αποτέλεσμα να προάγεται η συναγωγή θερμότητας, πράγμα ανεπιθύμητο, διότι εμποδίζει το σχηματισμό ευαίσθητης περιοχής, (γ) Η συναγωγή προάγεται επιπλέον και από το μικρό μήκος και πλάτος του δοχείου σε σχέση με το ύψος του, και (δ) Το δοχείο δεν είναι σε στεγανή επαφή με το ψυχόμενο δάπεδο, πράγμα που είναι απαραίτητο ώστε να μην παρατηρούνται διαρροές του μίγματος ατμού - αερίου και καταστρέφεται και από αυτήν την επιπλέον αιτία η ευαίσθητη περιοχή.

4.5.2 Θάλαμος B (Κατασκευαστική λύση)

Πέρα από τα παραδείγματα θαλάμων χαμηλών απαιτήσεων που δίνονται στο διαδίκτυο ή σε απλά εγχειρίδια (βλ. π.χ. Woithe, 2016) υπάρχουν και οι εμπορικά διαθέσιμοι θάλαμοι με πιο καλά χαρακτηριστικά ποιότητας που συμφωνούν καλύτερα με τις απαιτήσεις. Για παράδειγμα πωλούνται οι επαγγελματικοί θάλαμοι της NULEDO s.r.o. από την Τσεχία (www.nuledo.com), καθώς και οι εκπαιδευτικοί θάλαμοι της CloudChambersDotCom από τις Η.Π.Α. (www.cloudchambers.com). Οι θάλαμοι της πρώτης εταιρείας είναι μακριά από αυτούς που συζητούνται σε αυτήν τη Διπλωματική Εργασία διότι η τεχνολογία τους και οι διαστάσεις τους ξεφεύγουν από τις απλές ανάγκες ενός μαθήματος σχετικά με τις ιοντίζουσες ακτινοβολία και την ανίχνευσή τους. Πιο συγκεκριμένα η NULEDO s.r.o. προτείνει δύο θαλάμους πολύ υψηλών απαιτήσεων, τον NULEDO COMPACTA με επιφάνεια ψυχόμενου δαπέδου (= επιφάνεια παρατήρησης) 2500 cm^2 ($50 \times 50 \text{ cm}$) και τον NULEDO UNICA με επιφάνεια ψυχόμενου δαπέδου (= επιφάνεια παρατήρησης) 7225 cm^2 ($85 \times 85 \text{ cm}$). Οι θάλαμοι αυτοί ψύχονται σε χαμηλή θερμοκρασία με συσκευές Peltier και δεν έχουν ανάγκη για την ψύξη ούτε από ξηρό πάγο ούτε από υγρό άζωτο, παρά μόνο από ηλεκτρική ισχύ. Για παράδειγμα, ο θάλαμος NULEDO COMPACTA διακρίνεται στην Εικόνα 4.10.



Εικόνα 4.9: Θάλαμος νεφώσεως τύπου διαχύσεως NULEDO COMPACTA της εταιρείας NULEDO s.r.o.

Οι θάλαμοι της δεύτερης εταιρείας είναι δύο κατηγοριών. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν δύο τύποι, ο MCC-50 (Museum Cloud Chamber 50×50 cm) και ο MCC-100 (100×50 cm), οι οποίοι μπορούν να θεωρούνται ανάλογοι των θαλάμων της NULEDO s.r.o. επειδή είναι μεγάλου εμβαδού ψυχόμενου δαπέδου και ψύχονται με τεχνολογία Peltier. Για παράδειγμα, ο θάλαμος MCC-50 διακρίνεται στην Εικόνα 4.11.

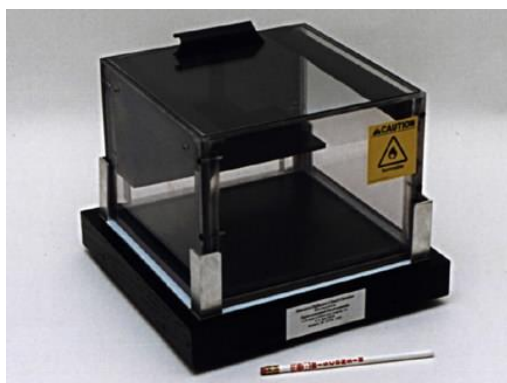


Εικόνα 4.10: Θάλαμος νεφώσεως τύπου διαχύσεως MCC-50 της εταιρείας CloudChambersDotCom.

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν δύο τύποι θαλάμων που είναι κοντά σε αυτούς που συζητούνται σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία. Πρόκειται για τον θάλαμο τύπου LHC-DC "Αμφιθέατρον" (Lecture Hall) με διαστάσεις επιφάνειας παρατήρησης 51×51 cm και τυπικό ύψος 20 cm και τον θάλαμο τύπου CRC-DC "Αίθουσα Διδασκαλίας" (Classroom) με διαστάσεις επιφάνειας παρατήρησης 25×25 cm και τυπικό ύψος 20 cm (βλ. Εικόνες 4.11 και 4.12 αντίστοιχα).



Εικόνα 4.11: Θάλαμος νεφώσεως τύπου διαχύσεως LHC-DC της εταιρείας CloudChambersDotCom.



Εικόνα 4.12: Θάλαμος νεφώσεως τύπου διαχύσεως CRC-DC της εταιρείας CloudChambersDotCom.

Όπως αναφέρει η CloudChambersDotCom, ο θάλαμος "Αμφιθεάτρου" μπορεί να λειτουργήσει για 8 ώρες καταναλώνοντας 14 kg ξηρού πάγου και 500 mL μεθανόλης. Δεν αναφέρεται αν η μεθανόλη πρέπει να τοποθετηθεί εφάπαξ ή να τροφοδοτηθεί σταδιακά. Ο θάλαμος "Αίθουσας Διδασκαλίας" μπορεί να λειτουργήσει για οκτώ ώρες καταναλώνοντας 7 kg ξηρού πάγου και 250 mL μεθανόλης. Δεν αναφέρεται ομοίως αν η μεθανόλη πρέπει να τοποθετηθεί εφάπαξ ή να τροφοδοτηθεί σταδιακά. Το ψυχόμενο δάπεδο του θαλάμου "Αμφιθεάτρου" μπορεί να ψυχθεί και με υγρό άζωτο με κατανάλωση 6 L ανά ώρα. Το ψυχόμενο δάπεδο του θαλάμου "Αίθουσας Διδασκαλίας" μπορεί να ψυχθεί επίσης και με υγρό άζωτο με κατανάλωση 1.5 L ανά ώρα.

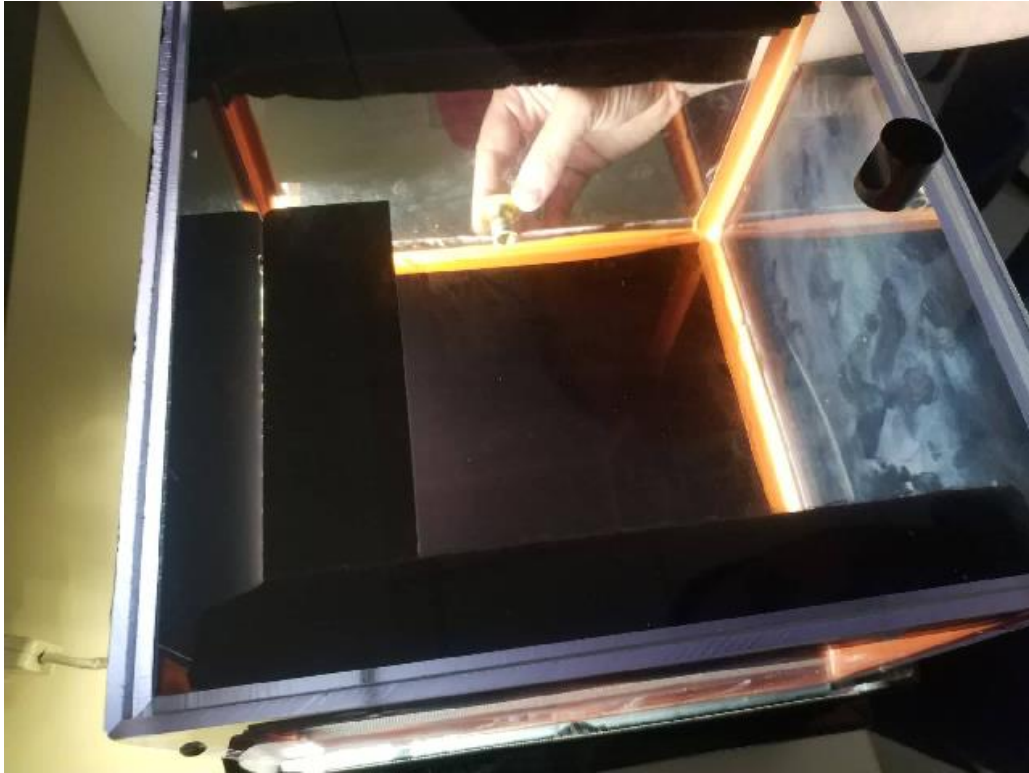
Στην Ελλάδα υπάρχει και χρησιμοποιείται για εκπαιδευτικούς σκοπούς στην Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) ένας θάλαμος "Αίθουσας Διδασκαλίας" της CloudChamberDotCom. Η γράφουσα είχε τη δυνατότητα να παρατηρήσει τα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία του θαλάμου αυτού στην ΕΕΑΕ, μετά από τη μεσολάβηση του επιβλέποντος τη Διπλωματική. Τα χαρακτηριστικά του θαλάμου έχουν ως εξής:

Διαστάσεις: Πλάτος: 25 cm, Μήκος 25 cm, Ύψος: 20 cm.

Υλικά κατασκευής: Τα πλευρά είναι φύλλα από διαφανές Plexiglass πάχους 8 mm. Το ψυχόμενο δάπεδο είναι από PVC, μαύρου χρώματος για να διευκολύνεται η αντίθεση, το πάχος του οποίου δεν μετρήθηκε. Η οροφή είναι αποσπώμενη από διαφανές Plexiglass και φέρει κατάλληλο σκαλοπάτι (πατούρα) για την ασφαλή τοποθέτησή της πάνω στο θάλαμο. Η τοποθέτηση γίνεται έτσι ώστε ο θάλαμος να σκεπάζεται πλήρως χωρίς όμως να εξασφαλίζεται πλήρης στεγανότητα. Η οροφή φέρει λαβή για ευκολότερους χειρισμούς.

Άλλα χαρακτηριστικά: Περιφερειακά στο εσωτερικό των πλευρών υπάρχει κολλημένη μαύρη τσόχα, η οποία διαβρέχεται πλήρως από μεθανόλη, ώστε να λειτουργήσει ως τροφοδότης ατμών. Το φως παρέχεται από συστοιχία LED. Το φως προσπίπτει στο θάλαμο μόνο από μία πλευρά. Η φωτιζόμενη πλευρά είναι έτσι διαμορφωμένη ώστε το φως να φωτίζει το χαμηλότερο μέρος του θαλάμου, τον όγκο δηλαδή στον οποίο αναμένεται να σχηματισθεί κατ' αρχάς η ευαίσθητη περιοχή. Για το σκοπό αυτό η πλευρά από ένα ύψος και πάνω και μέχρι το ύψος της οροφής καλύπτεται από παραλληλόγραμμο μαύρο αυτοκόλλητο. Μάλιστα, στο κατώτερο ύψος του αυτοκόλλητου έχει τοποθετηθεί, στο εσωτερικό του θαλάμου, σκίαστρο από μαύρο Plexiglass, το οποίο εμποδίζει το φως να προσβάλλει απευθείας την όραση του παρατηρητή, ώστε αυτός να μπορεί να παρατηρεί με καλύτερη ευχέρεια τα ίχνη. Η αναγκαία στεγανότητα μεταξύ πλευρών και μεταξύ πλευρών και ψυχόμενου δαπέδου εξασφαλίζεται με παχύ στρώμα σιλικόνης στις γωνίες. Σε μία από τις πλευρές υπάρχει μικρό άνοιγμα κατάλληλο για την υποδοχή αξονικών πηγών ή κυλινδρικών πηγών μικρής διαμέτρου, από την κυκλική βάση των οποίων εκλύεται ιοντίζουσα ακτινοβολία. Για την λειτουργία του θαλάμου η CloudChambersDotCom παρέχει εγχειρίδιο οδηγιών (βλ. CloudChambersDotCom, 2001)

Στις Εικόνες 4.13 και 4.14 φαίνεται αυτός ο θάλαμος της ΕΕΑΕ, όπως επιδείχθηκε στη γράφουσα νωρίτερα φέτος, όπου διακρίνονται σχεδόν όλα τα αναφερόμενα χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό ασφαλώς με αυτά που διακρίνονται στην Εικόνα 4.12.



Εικόνα 4.13: Κάτοψη θαλάμου νεφώσεως τύπου διαχύσεως CRC-DC της ΕΕΑΕ. Διακρίνεται η διαφανής οροφή, η σιλικόνη για τη στεγανότητα (πορτοκαλί χρώμα) και μικρή θύρα για την τοποθέτηση πηγών.



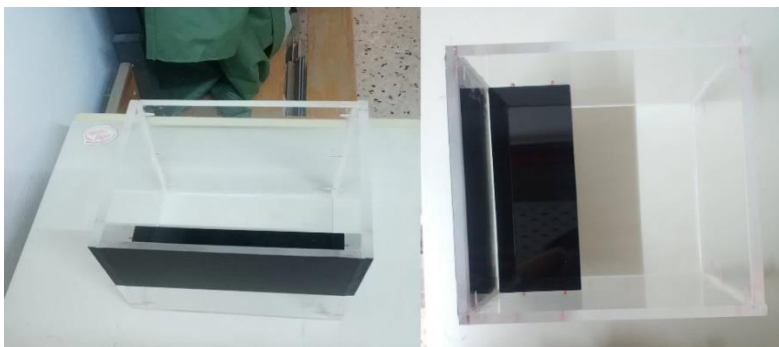
Εικόνα 4.14: Πλάγια όψη θαλάμου νεφώσεως τύπου διαχύσεως CRC-DC της ΕΕΑΕ. Διακρίνεται η σιλικόνη για τη στεγανότητα (πορτοκαλί χρώμα) και μικρή θύρα για την τοποθέτηση πηγών.

Κατά την επίδειξη λειτουργίας του θαλάμου, δεν χρησιμοποιήθηκε μεθανόλη αλλά αιθανόλη. Για την επίδειξη ο θάλαμος τοποθετήθηκε μέσα σε δοχείο ώστε το ψυχόμενο δάπεδο να έχει καλή επαφή με επιφάνεια από πλάκες ξηρού πάγου. Η αιθανόλη που χρησιμοποιήθηκε τοποθετήθηκε χύδην στο θάλαμο, οι τσόχες περιφερειακά στην οροφή του θαλάμου δεν χρησιμοποιήθηκαν για τροφοδοσία ατμών. Τα αποτελέσματα ήταν ότι παρατηρήθηκαν ευκρινώς ίχνη σχετιζόμενα με ιοντίζουσα ακτινοβολία -α σωματιδίων και ηλεκτρονίων.

Μετά την επίδειξη του θαλάμου "Αίθουσας Διδασκαλίας" της CloudChambersDotCom στην ΕΕΑΕ, κρίθηκε ότι αυτός μπορεί να είναι ένα καλό και δοκιμασμένο πρότυπο για κατασκευή θαλάμου για τους σκοπούς της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Με τον περιορισμό ότι ο θάλαμος θα πρέπει να χωράει με άνεση στην ψυχόμενη επιφάνεια με υγρό άζωτο κατασκευάστηκε θάλαμος ανάλογος με τον CRC-DC με μικρότερες διαστάσεις και άλλα χαρακτηριστικά ως εξής:

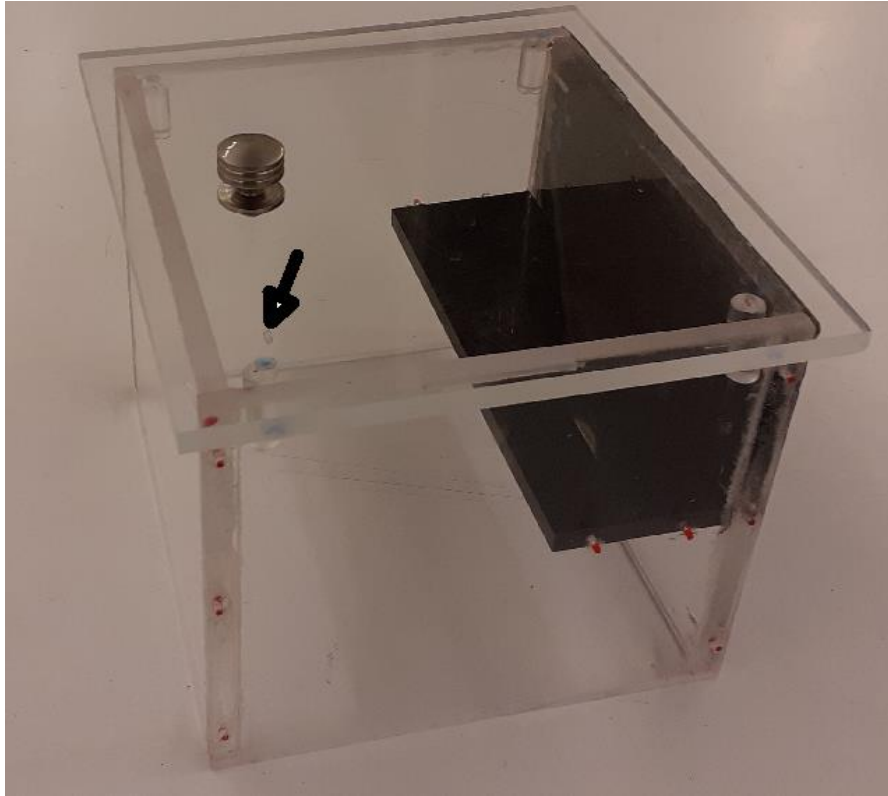
Διαστάσεις: Καθαρό πλάτος: 16 cm, Καθαρό μήκος: 18.5 cm, Καθαρό ύψος: 15 cm.

Υλικά κατασκευής: Τα πλευρά είναι φύλλα από διαφανές Plexiglass πάχους 8 mm. Δεν υπάρχει ψυχόμενο δάπεδο ή άλλο πάτωμα (βλ. Εικόνα 4.15).



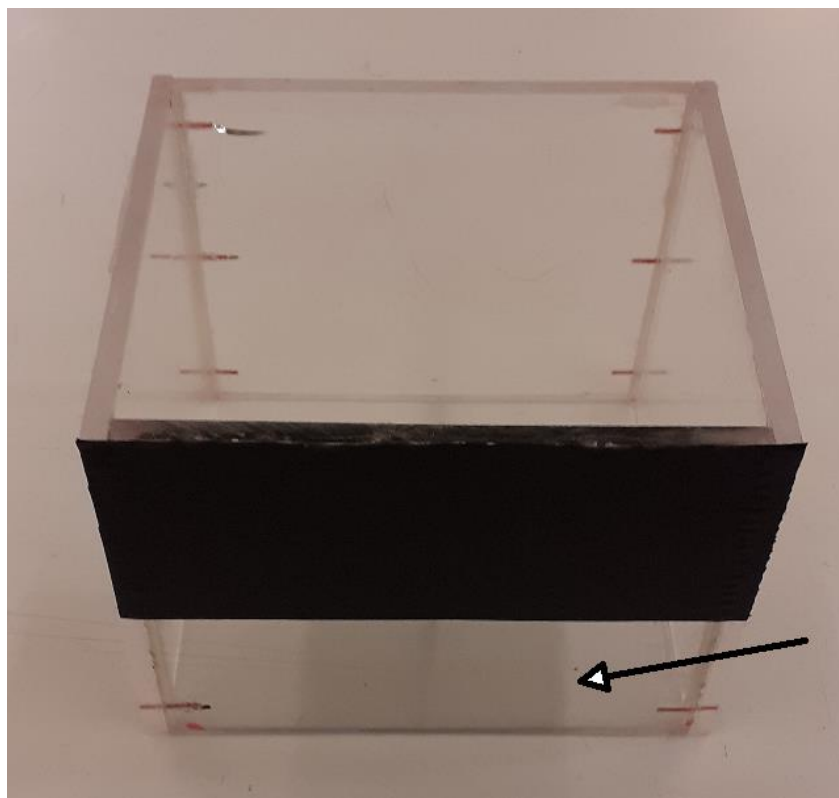
Εικόνα 4.14: Διάφορες όψεις του καθοδικού θαλάμου Β όπως κατασκευάστηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Το ελεύθερο πάτωμα του θαλάμου θεωρήθηκε ότι μπορεί να προσαρμοσθεί στεγανά στο ψυχόμενο δάπεδο που ψύχεται με υγρό άζωτο. Η οροφή είναι αποσπώμενη από διαφανές Plexiglass και φέρει κατάλληλους πύρους στις γωνίες για την ασφαλή τοποθέτησή της πάνω στο θάλαμο (βλ. Εικόνα 4.15). Η τοποθέτηση γίνεται έτσι ώστε ο θάλαμος να σκεπάζεται πλήρως χωρίς όμως να εξασφαλίζεται πλήρης στεγανότητα. Η οροφή φέρει λαβή για ευκολότερους χειρισμούς.



Εικόνα 4.15: Όψη του καθοδικού θαλάμου Β όπως κατασκευάστηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Διακρίνονται το ανοιχτό δάπεδο και το διαφανές κάλυμμα οροφής με τους πύρους τοποθέτησης. Στη θέση του βέλους άνοιγμα για την τοποθέτηση αξονικών πηγών.

Άλλα χαρακτηριστικά: Περιφερειακά στο εσωτερικό των πλευρών μπορεί να κολληθεί μαύρη τσόχα, η οποία να διαβρέχεται πλήρως από αλκοόλη, ώστε να λειτουργήσει ως τροφοδότης ατμών. Αυτό αφέθηκε να γίνει σε μεταγενέστερο στάδιο αν οι δοκιμές με χύδην αλκοόλη δεν επιτρέψουν καλά αποτελέσματα. Το φως παρέχεται από εξωτερική πηγή, τον προβολέα διαφανειών που έχει ήδη αναφερθεί.. Το φως προσπίπτει στο θάλαμο μόνο από μία πλευρά. Η φωτιζόμενη πλευρά είναι έτσι διαμορφωμένη ώστε το φως να φωτίζει το χαμηλότερο μέρος του θαλάμου, τον όγκο δηλαδή στον οποίο αναμένεται να σχηματισθεί κατ' αρχάς η ευαίσθητη περιοχή. Για το σκοπό αυτό η πλευρά από ένα ύψος και πάνω και μέχρι το ύψος της οροφής καλύπτεται από παραλληλόγραμμο μαύρο αυτοκόλλητο (βλ. Εικόνα 4.16).

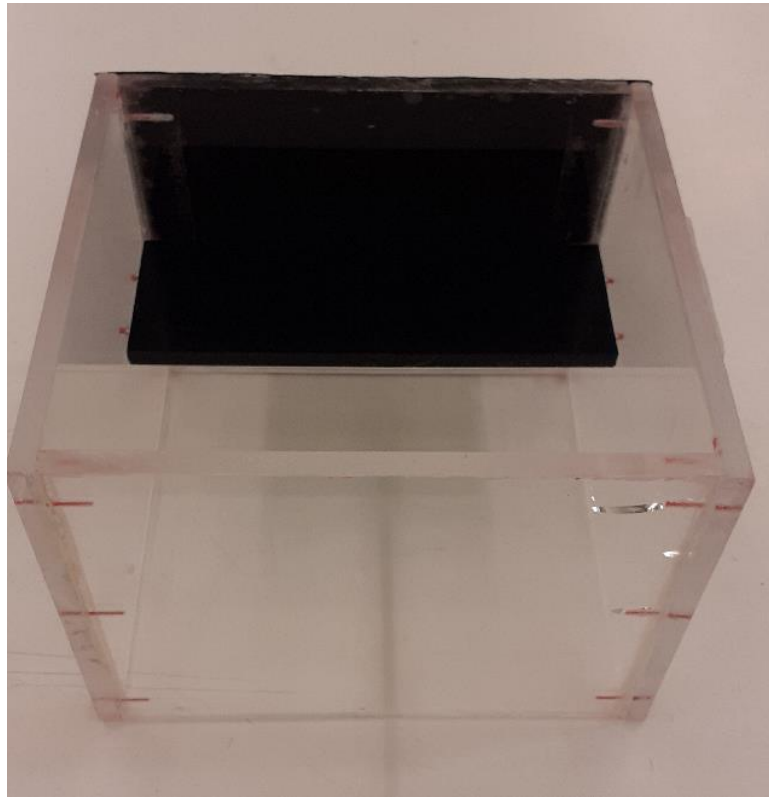


Εικόνα 4.16: Όψη του καθοδικού θαλάμου Β όπως κατασκευάστηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Διακρίνεται με την υπόδειξη του βέλους, η φωτιζόμενη πλευρά και το μαύρο αυτοκόλλητο που καλύπτει το άνω μέρος της.

Μάλιστα, στο κατώτερο ύψος του αυτοκόλλητου έχει τοποθετηθεί, στο εσωτερικό του θαλάμου, σκίαστρο από μαύρο Plexiglass, το οποίο εμποδίζει το φως να προσβάλλει απευθείας την όραση του παρατηρητή, ώστε αυτός να μπορεί να παρατηρεί με καλύτερη ευχέρεια τα ίχνη (βλ. Εικόνα 4.17). Η αναγκαία στεγανότητα μεταξύ πλευρών εξασφαλίστηκε με συνδυασμό πολλών τρόπων. Κατ' αρχήν ο θάλαμος συγκροτήθηκε από τα φύλλα Plexiglass με τη βοήθεια οπών, στις οποίες τοποθετήθηκε κόλλα (τύπου UHU) και πλαστικοί πύροι μικρής διαμέτρου, οι οποίοι φαίνονται με κόκκινο χρώμα σε αρκετές από τις εικόνες. Στη συνέχεια στις διεπιφάνειες επαφής των πλευρών μεταξύ τους τοποθετήθηκε με σύριγγα κόλλα Plexiglass (με βάση το χλωροφόρμιο, η προμήθεια της οποίας έγινε από τον προμηθευτή¹ των φύλλων Plexiglass). Την επόμενη ημέρα οι ενώσεις των πλευρών καλύφθηκαν εσωτερικά και εξωτερικά με ένα λεπτό στρώμα από διαφανή σιλικόνη. Ο λόγος αυτής της πολλαπλής φροντίδας ήταν ότι η ψύξη με υγρό άζωτο δημιουργεί μεγάλη βαθμίδα μείωσης θερμοκρασίας, όχι μόνο στο μίγμα ατμών - αερίου στο εσωτερικό του θαλάμου αλλά και στα πλευρικά τοιχώματά του, τα οποία έπρεπε να συγκροτηθούν έτσι ώστε να αντέξουν

¹ Προμηθευτής και κοπή σε διαστάσεις φύλλων από Plexiglass: TEXNOΓΡΑΜΜΗ Α.Ε., Λεωχάρους 17, 10560 Αθήνα, τηλ. 2103229321

την καταπόνηση. Σε μία από τις πλευρές ανοίχθηκε μικρό άνοιγμα κατάλληλο για την υποδοχή αξονικών πηγών ή κυλινδρικών πηγών μικρής διαμέτρου, από την κυκλική βάση των οποίων εκλύεται ιοντίζουσα ακτινοβολία.



Εικόνα 4.17: Όψη του καθοδικού θαλάμου Β όπως κατασκευάστηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Διακρίνεται το σκίαστρο από μαύρο Plexiglass.

4.6 Δοκιμές - φάση Α

(α) Δοκιμή #Α1

Χαρακτηριστικά δοκιμής:

Ψυχόμενο δάπεδο: με υγρό άζωτο, το άζωτο παρέχεται με πίεση από το δοχείο μεταφοράς των 30 L (βλ. Κεφάλαιο 3), Θάλαμος: Α, Πηγή φωτός: Φακός ή κινητό τηλέφωνο, Ατμοί: από μίγμα αιθανόλης - νερού 95% παραγόμενοι στην τσόχα της οροφής, Πηγή: Sr-90 5μCi ή 185 kBq, τοποθετημένη στο εσωτερικό του θαλάμου.

Σκοπός δοκιμής:

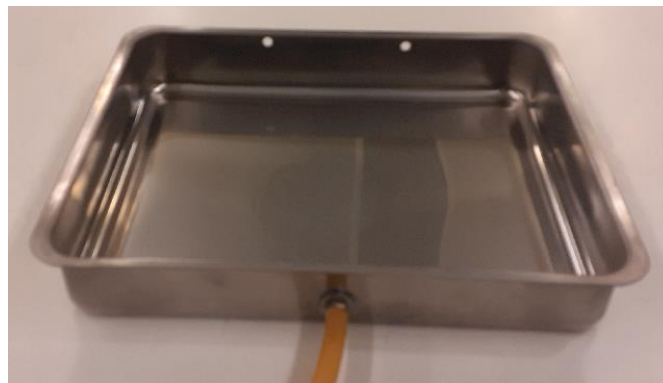
Πρόχειρη - διερευνητική

Αποτελέσματα δοκιμής:

Παρατηρήθηκε αραιό μάλλον ανεπαρκές νέφος διαχεόμενων ατμών, σε μικρό ύψος από το ψυχόμενο δάπεδο, δεν παρατηρήθηκαν ίχνη από την πηγή. Πιθανώς διαπιστώθηκαν ένα ή δύο μίονια, τα οποία δεν φωτογραφήθηκαν. Η ορατότητα ήταν γενικά κακή. Τα λεπτά πλαστικά τοιχώματα του θαλάμου Α "θόλωναν" λόγω υγροποίησης της υγρασίας του αέρα, εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ περιβάλλοντος και εσωτερικού του θαλάμου.

Περιγραφή δοκιμής και παρατηρήσεις:

Για τη δοκιμή αυτή δεν είχε ακόμα ετοιμασθεί το ψυχόμενο δάπεδο με υγρό άζωτο, το οποίο περιγράφεται στην ενότητα 4.3.2. Επομένως το ψυχόμενο δάπεδο συγκροτήθηκε διαφορετικά ως εξής: Λήφθηκε μία γαλβανισμένη λαμαρίνα πάχους 1 mm και διαστάσεων 50×50 cm. Η πλευρά που θα λειτουργούσε ως δάπεδο του θαλάμου βάφτηκε με αστάρι για γαλβανισμένη επιφάνεια και στη συνέχεια βάφτηκε με μαύρο πλαστικό χρώμα. Για την ψύξη με υγρό άζωτο, η λαμαρίνα τοποθετήθηκε πάνω από ένα ανοξείδωτο ταψί ονομαστικής επιφάνειας ~37×30 cm και βάθους ~6 cm. Στη μεγάλη πλευρά του ταψιού τοποθετήθηκε ένα ακροφύσιο εισόδου υγρού αζώτου. Στην απέναντι μεγάλη πλευρά του ταψιού ανοίχθηκαν οπές κοντά στο χείλος, ώστε από εκεί να υπερχειλίζει το υγρό άζωτο. Το ταψί με αυτή τη μορφοποίηση διακρίνεται στην Εικόνα 4.18. Η διάταξη του πειράματος διακρίνεται (σε αναπαράσταση) στην Εικόνα 4.19. Φωτογραφία από τη δοκιμή διακρίνεται στην Εικόνα 4.20.

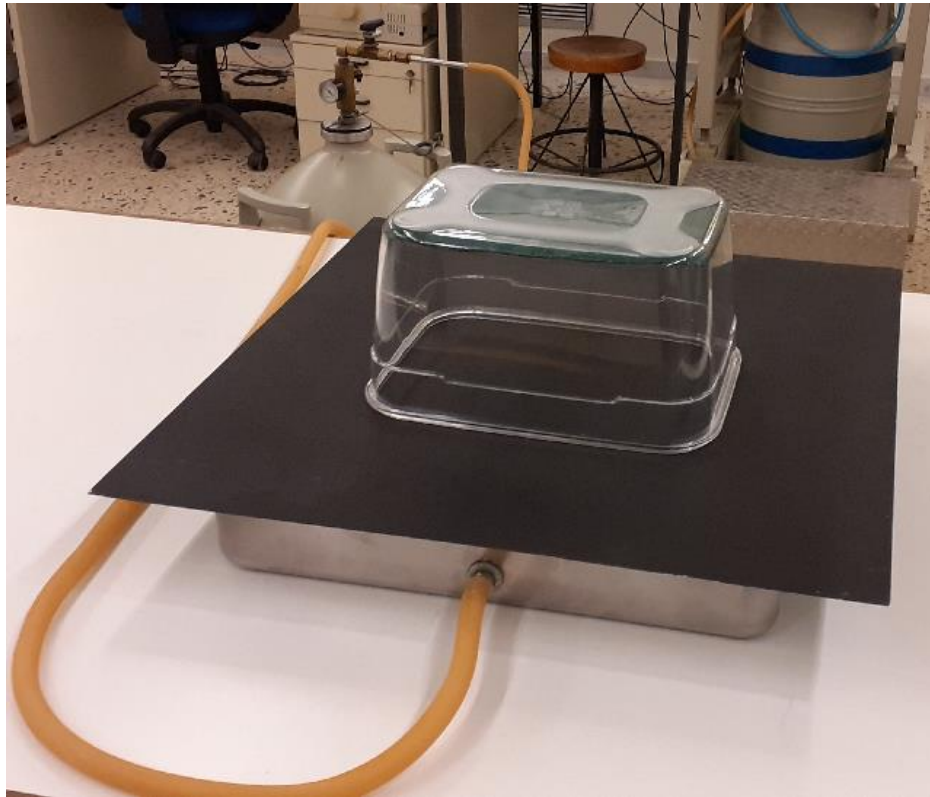


Εικόνα 4.18: Ανοξείδωτο δοχείο που πληρώνεται με υγρό άζωτο, ώστε να ψύχει μεταλλική επιφάνεια που το σκεπάζει

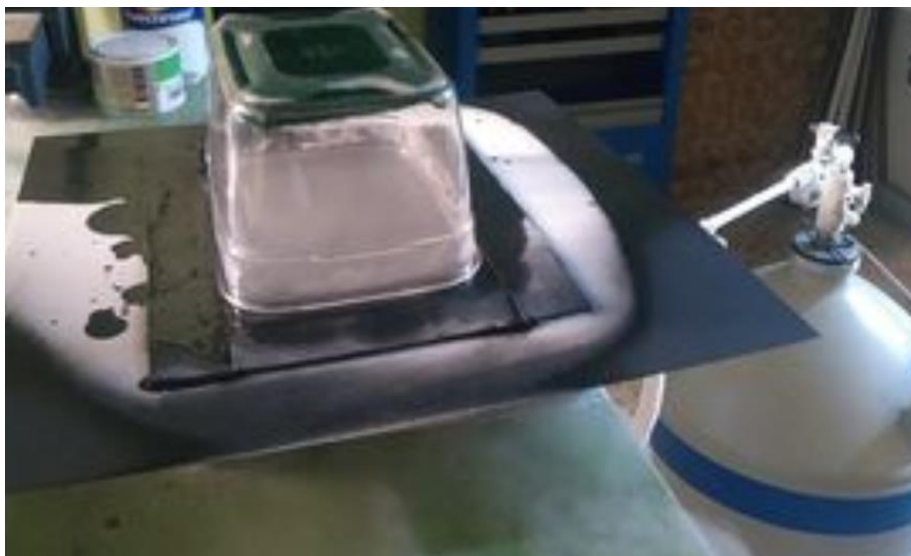
Σχόλια και συμπεράσματα:

(1) Προέκυψε αμέσως ότι ο τρόπος δημιουργίας του ψυχόμενου δαπέδου πρέπει να επαναπροσδιορισθεί κυρίως διότι οι απώλειες αζώτου ήταν πολύ μεγάλες με αποτέλεσμα να σχηματίζονται ενοχλητικές ποσότητες πάγου από την στερεοποίηση της υγρασίας της ατμόσφαιρας γύρω και πάνω από το ταψί και τη γαλβανισμένη λαμαρίνα (βλ. και Εικόνα

4.23). Επιπλέον δεν ήταν βέβαιο ότι το υγρό άζωτο ήταν σε καλή επαφή με το δάπεδο. Για να αντιμετωπισθούν αυτά έγιναν επόμενες δοκιμές και μέρος των σκέψεων που οδήγησαν στην κατασκευή που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.3.2.



Εικόνα 4.19: Η διάταξη της δοκιμής #A1 σε αναπαράσταση. Διακρίνεται πίσω αριστερά και το δοχείο Dewar μεταφοράς υγρού αζώτου.



Εικόνα 4.20: Φωτογραφία από τη δοκιμή #A1. Διακρίνεται νέφος ατμών αλκοόλης σε χαμηλό ύψος.

(2) Διαπιστώθηκε ότι το πλαστικό μαύρο χρώμα καταπονείται και αποκολλάται λόγω της έντονης ψύξης. Έγινε η σκέψη ότι πρέπει να αντικατασταθεί από μαύρη αυτοκόλλητη ταινία μεγάλου πλάτους ή από μαύρο αυτοκόλλητο.

(3) Η έλλειψη παραγωγής ιχνών αποδόθηκε στο ότι: (3α) ο θάλαμος A έχει μειονεκτήματα που έχουν ήδη αναφερθεί, (3β) υπήρχαν διαρροές νέφους από τη διεπαφή θαλάμου και ψυχόμενου δαπέδου, μέρος των διαρροών οφείλονταν στο ότι η επιφάνεια του ψυχόμενου δαπέδου, όντας μικρού πάχους, είχε παραμορφωθεί από τις συστολές λόγω της έντονης ψύξης με υγρό άζωτο, (3γ) Η πηγή Sr-90 εκπέμπει ηλεκτρόνια μεγάλης ενέργειας με μέγιστη τιμή ~550 keV. Το παραγόμενο από τη διάσπαση του Sr-90, Y-90 εκπέμπει επίσης ηλεκτρόνια μεγάλης ενέργειας με μέγιστη τιμή ~2300 keV. Είναι δηλαδή πολύ πιθανό τα ηλεκτρόνια αυτά να διασχίζουν το θάλαμο χωρίς να ιονίσουν και άρα να δημιουργήσουν πυρήνες συμπύκνωσης. Η σκέψη αυτή ενισχύεται από το ότι η CloudChambersDotCom χρησιμοποιεί στους θαλάμους της πηγές ηλεκτρονίων μικρότερης ενέργειας ισοτόπου C-14, της οποίας τα ηλεκτρόνια έχουν μέγιστη ενέργεια 156 keV (βλ. CloudChambersDotCom, 2008), (3δ) Η πηγή Sr-90 (5 μ Ci) είναι ακατάλληλα μικρής ραδιενέργειας για τις δοκιμές. Η σκέψη αυτή ενισχύεται από το ότι η CloudChambersDotCom χρησιμοποιεί στους θαλάμους της πηγές C-14 πολύ μεγαλύτερης ραδιενέργειας 150 mCi (= 5.5 GBq).

(4) Ο θάλαμος A δεν επιτρέπει παρατηρήσεις από την οροφή. Την ορατότητα εμπόδισε και η θολότητα λόγω συμπύκνωσης υγρασίας στα εξωτερικά τοιχώματα του θαλάμου.

(β) Δοκιμή #A2

Χαρακτηριστικά δοκιμής:

Ψυχόμενο δάπεδο: με υγρό άζωτο, το άζωτο παρέχεται με πίεση από το δοχείο μεταφοράς των 30 L (βλ. Κεφάλαιο 3), Θάλαμος: A, Πηγή φωτός: προβολέας διαφανειών, Ατμοί: από μίγμα αιθανόλης - νερού 95% παραγόμενοι στην τσόχα της οροφής, Πηγή: Sr-90 5 μ Ci ή 185 kBq, τοποθετημένη στο εσωτερικό του θαλάμου. Επιδιώχθηκε μία καλύτερη μόνωση του θαλάμου έναντι διαρροών ατμών από το δάπεδο περιχύνοντας μία μικρή ποσότητα αιθανόλης στα σημεία επαφής του θαλάμου με το ψυχόμενο δάπεδο.

Σκοπός δοκιμής:

Βελτίωση του συστήματος ψύξης με υγρό άζωτο

Αποτελέσματα δοκιμής:

Σε σχέση με την προηγούμενη δοκιμή παρατηρήθηκε πυκνότερο καλύτερο νέφος διαχεόμενων ατμών, σε μικρό ύψος από το ψυχόμενο δάπεδο, δεν παρατηρήθηκαν ίχνη από την πηγή. Πιθανώς διαπιστώθηκαν ένα ή δύο μόνια, τα οποία δεν φωτογραφήθηκαν. Η ορατότητα ήταν γενικά κακή. Τα λεπτά πλαστικά τοιχώματα του θαλάμου Α "θόλωναν" λόγω υγραποίησης της υγρασίας του αέρα, εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ περιβάλλοντος και εσωτερικού του θαλάμου.

Περιγραφή δοκιμής και παρατηρήσεις:

Για τη δοκιμή αυτή δεν είχε ακόμα ετοιμασθεί το ψυχόμενο δάπεδο με υγρό άζωτο, το οποίο περιγράφεται στην ενότητα 4.3.2. Επομένως το ψυχόμενο δάπεδο συγκροτήθηκε διαφορετικά ως εξής: Ο θάλαμος Α τοποθετήθηκε με το άνοιγμα προς τα κάτω σε ένα ταψί με ονομαστικές διαστάσεις ~31×24 cm και βάθος ~5 cm. Το ταψί αυτό είχε μαύρο - γκρι πυρίμαχο χρώμα από κατασκευής (βλ. Εικόνα 4.21).



Εικόνα 4.21: Προετοιμασία ψυχόμενης επιφάνειας για τη δοκιμή #A2.

Το ταψί τοποθετήθηκε μέσα σε ένα μεγαλύτερο ανοξείδωτο ταψί όμοιο με αυτό της προηγούμενης δοκιμής. Στο πάτωμα του ανοξείδωτου ταψιού τοποθετήθηκε μικρή σχάρα που εμπόδιζε το μικρότερο ταψί να είναι σε επαφή με το δάπεδο του μεγαλύτερου ταψιού ώστε το κενό να μπορεί να πληρωθεί με υγρό άζωτο (βλ. Εικόνα 4.22).



Εικόνα 4.22: Προετοιμασία δοχείου υποδοχής υγρού αζώτου για τη δοκιμή #A2.

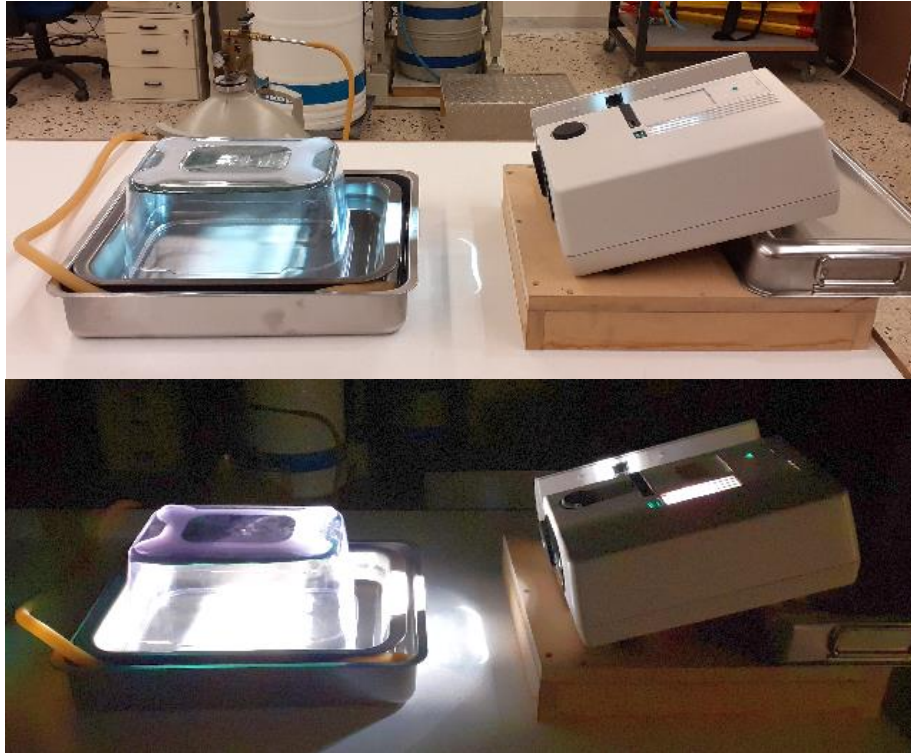
Στη συνέχεια το μεγαλύτερο ταψί πληρώθηκε με υγρό άζωτο και ξεκίνησαν οι παρατηρήσεις με τη βοήθεια της πηγής φωτός από τον προβολέα διαφανειών. Προκειμένου το φως από τον προβολέα να περιορισθεί στον όγκο που αναμένεται η ευαίσθητη περιοχή, τοποθετήθηκε στον προβολέα ένα πλαίσιο από διαφάνεια με διαμόρφωση ορθογωνίου παραλληλόγραμμου διαφράγματος που δημιουργήθηκε με μονωτική ταινία (βλ. Εικόνα 4.23). Η διάταξη του πειράματος (σε αναπαράσταση) διακρίνεται στην Εικόνα 4.24.



Εικόνα 4.23: Διάφραγμα για την πηγή φωτισμού

Σχόλια και συμπεράσματα:

(1) Παρόλο που σε αυτή τη διάταξη η επαφή του ψυχόμενου δαπέδου με το υγρό άζωτο είχε εξασφαλισθεί προέκυψε και πάλι ότι ο τρόπος δημιουργίας του ψυχόμενου δαπέδου πρέπει να επαναπροσδιορισθεί κυρίως διότι οι απώλειες αζώτου ήταν πολύ μεγάλες με αποτέλεσμα να σχηματίζονται ενοχλητικές ποσότητες πάγου από την στερεοποίηση της υγρασίας της ατμόσφαιρας γύρω από τα ταψιά. Επιπλέον τα πλευρικά τοιχώματα του μικρότερου σκεύους δυσκόλεψαν την παρατήρηση του νέφους που σχηματίστηκε κοντά στο ψυχόμενο δάπεδο. Για να αντιμετωπισθούν αυτά έγιναν επόμενες δοκιμές και μέρος των σκέψεων που οδήγησαν στην κατασκευή που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.3.2.



Εικόνα 4.24: Η διάταξη της δοκιμής #A2 σε αναπαράσταση.
Άνω: με φωτισμό δωματίου. Κάτω: με φωτισμό πειράματος.

(2) Διαπιστώθηκε ότι το μαύρο χρώμα με το οποίο ήταν χρωματισμένο το μικρότερο ταψί ήταν ανθεκτικό στην ψύξη με το υγρό άζωτο, πράγμα που προφανώς οφείλεται στον πυρίμαχο χαρακτήρα του.

(3) Η έλλειψη παραγωγής ιχνών αποδόθηκε στο ότι: (3α) ο θάλαμος A έχει μειονεκτήματα που έχουν ήδη αναφερθεί, (3β) υπήρχαν διαρροές νέφους από τη διεπαφή θαλάμου και ψυχόμενου δαπέδου, μέρος των διαρροών οφείλονταν στο ότι η επιφάνεια του ψυχόμενου δαπέδου, όντας μικρού πάχους, είχε παραμορφωθεί από τις συστολές λόγω της έντονης ψύξης με υγρό άζωτο, (3γ) Η πηγή Sr-90 εκπέμπει ηλεκτρόνια μεγάλης ενέργειας (3δ) Η πηγή Sr-90 (5 μCi) είναι ακατάλληλα μικρής ραδιενέργειας για τις δοκιμές.

(4) Ο θάλαμος A δεν επιτρέπει παρατηρήσεις από την οροφή. Αυτό σε συνδυασμό με τον περιορισμό της πλευρικής ορατότητας λόγω των κατακόρυφων τοιχωμάτων του μικρότερου σκεύους δυσκόλεψε πολύ την παρατήρηση. Το ίδιο εμπόδιζε η θολότητα λόγω συμπύκνωσης υγρασίας στα εξωτερικά τοιχώματα του θαλάμου.

Μία φωτογραφία του καλύτερου νέφους που παρατηρήθηκε σε αυτή τη δοκιμή δίνεται στην Εικόνα 4.25.



Εικόνα 4.25: Νέφος σε χαμηλό ύψος από τη δοκιμή #A2.

(γ) Δοκιμή #A3

Χαρακτηριστικά δοκιμής:

Ψυχόμενο δάπεδο: με υγρό άζωτο, το άζωτο παρέχεται με πίεση από το δοχείο μεταφοράς των 30 L (βλ. Κεφάλαιο 3), Θάλαμος: A, Πηγή φωτός: προβολέας διαφανειών με διάφραγμα, βλ. σχετικά δοκιμή #A2, Ατμοί: από μίγμα αιθανόλης - νερού 95% παραγόμενοι στην τσόχα της οροφής, Πηγή: Sr-90 5μCi ή 185 kBq, τοποθετημένη στο εσωτερικό του θαλάμου. Επιδιώχθηκε μία καλύτερη μόνωση του θαλάμου έναντι διαρροών ατμών από το δάπεδο περιχύνοντας μία μικρή ποσότητα αιθανόλης στα σημεία επαφής του θαλάμου με το ψυχόμενο δάπεδο.

Σκοπός δοκιμής:

Βελτίωση του συστήματος ψύξης με υγρό άζωτο

Αποτελέσματα δοκιμής:

Παρόμοια ή χειρότερα από αυτά της δοκιμής #A1.

Περιγραφή δοκιμής και παρατηρήσεις:

Για τη δοκιμή αυτή δεν είχε ακόμα ετοιμασθεί το ψυχόμενο δάπεδο με υγρό άζωτο, το οποίο περιγράφεται στην ενότητα 4.3.2. Επομένως το ψυχόμενο δάπεδο συγκροτήθηκε διαφορετικά ως εξής: Ο θάλαμος A τοποθετήθηκε με το άνοιγμα προς τα κάτω σε ένα ταψί με ονομαστικές διαστάσεις ~31×24 cm και βάθος ~5 cm. Το ταψί αυτό είχε μαύρο πυρίμαχο χρώμα από κατασκευής (βλ. Εικόνα 4.21). Το ταψί τοποθετήθηκε μέσα σε ένα μεγαλύτερο δοχείο από φελιζόλ (Styrofoam, π.χ. σαν αυτό της Εικόνας 4.26).



Εικόνα 4.26: Δοχεία φελιζόλ σαν αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή #A3

Στο πάτωμα του κουτιού τοποθετήθηκε μικρή σχάρα που εμπόδιζε το μικρότερο ταψί να είναι σε επαφή με το δάπεδο του δοχείου ώστε το κενό να μπορεί να πληρωθεί με υγρό άζωτο (ανάλογα όπως στην Εικόνα 4.22). Στη συνέχεια το δοχείο πληρώθηκε με υγρό άζωτο και ξεκίνησαν οι παρατηρήσεις με τη βοήθεια της πηγής φωτός από τον προβολέα διαφανειών. Η διάταξη του πειράματος ήταν ανάλογη με αυτή της δοκιμής #A2 (βλ. Εικόνα 4.24).

Σχόλια και συμπεράσματα:

(1) Παρόλο που σε αυτή τη διάταξη η επαφή του ψυχόμενου δαπέδου με το υγρό άζωτο είχε εξασφαλισθεί προέκυψε και πάλι ότι ο τρόπος δημιουργίας του ψυχόμενου δαπέδου πρέπει να επαναπροσδιορισθεί κυρίως διότι οι απώλειες αζώτου ήταν πολύ μεγάλες με αποτέλεσμα να σχηματίζονται ενοχλητικές ποσότητες πάγου από την στερεοποίηση της υγρασίας της ατμόσφαιρας γύρω από το ταψί και το δοχείο. Επίσης λόγω της σημαντικής επιφάνειας του δοχείου από φελιζόλ, παρατηρήθηκαν και νέφη υγρασίας ή/και νέφη από την εξάχνωση του αζώτου. Επιπλέον τα πλευρικά τοιχώματα του ταψιού και του δοχείου από φελιζόλ δυσκόλεψαν την παρατήρηση του εσωτερικού του θαλάμου, πολύ περισσότερο και από τη δοκιμή #A2. Για να αντιμετωπισθούν αυτά έγιναν επόμενες δοκιμές και μέρος των σκέψεων που οδήγησαν στην κατασκευή που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.3.2.

(2) Ο θάλαμος A δεν επιτρέπει παρατηρήσεις από την οροφή. Αυτό σε συνδυασμό με τον περιορισμό της πλευρικής ορατότητας λόγω των κατακόρυφων τοιχωμάτων του ταψιού και του δοχείου από φελιζόλ δυσκόλεψε πολύ την παρατήρηση. Το ίδιο εμπόδισε η θολότητα λόγω συμπύκνωσης υγρασίας στα εξωτερικά τοιχώματα του θαλάμου.

(δ) Δοκιμή #A4

Χαρακτηριστικά δοκιμής:

Ψυχόμενο δάπεδο: με ξηρό πάγο (βλ. τα αναφερόμενα στην ενότητα 4.3.1), Θάλαμος: A, Πηγή φωτός: προβολέας διαφανειών με διάφραγμα, βλ. σχετικά δοκιμή #A2, Ατμοί: από μίγμα ισοπροπυλικής αλκοόλης - νερού 95% παραγόμενοι στην τσόχα της οροφής, Πηγή: Sr-90 5μCi ή 185 kBq, τοποθετημένη στο εσωτερικό του θαλάμου. Επιδιώχθηκε μία καλύτερη μόνωση του θαλάμου έναντι διαρροών ατμών από το δάπεδο περιχύνοντας μία μικρή ποσότητα αιθανόλης στα σημεία επαφής του θαλάμου με το ψυχόμενο δάπεδο.

Σκοπός δοκιμής:

Παρατήρηση αναμενόμενων αποτελεσμάτων με τη συμβατική μέθοδο του ξηρού πάγου (βλ. π.χ. και Woithe, 2016)

Αποτελέσματα δοκιμής:

Παρόμοια ή λίγο καλύτερα από αυτά της δοκιμής #A1.

Περιγραφή δοκιμής και παρατηρήσεις:

Για τη δοκιμή αυτή αγοράστηκαν 5 kg ξηρού πάγου² σε κυλινδρικούς διαμέτρου 16 mm (αυτό είναι και το ελάχιστο βάρος παραγγελίας), ο οποίος παραδόθηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ σε μονωμένο κιβώτιο από φελιζόλ. Μία ποσότητα από τον ξηρό πάγο τοποθετήθηκε στο δοχείο της Εικόνας 4.1 (η συνολική ποσότητα ξηρού πάγου που αγοράστηκε φθάνει για 3 - 4 γεμίσματα του δοχείου, επιπλέον ένα γέμισμα φαίνεται ότι αρκεί για λειτουργία 2 - 3 ωρών τουλάχιστον). Ο ξηρός πάγος καλύφθηκε με λαμαρίνα αλουμινίου διαστάσεων 35×29 cm πάχους 4 mm. Η λαμαρίνα αυτή μπορεί να βυθίζεται στο δοχείο ακολουθώντας τη μείωση του όγκου του ξηρού πάγου λόγω της σταδιακής του εξάχνωσης, ώστε να παραμένει διαρκώς σε καλή επαφή με τον ξηρό πάγο, όσο αυτός υπάρχει. Η άνω επιφάνεια της λαμαρίνας ήταν καλυμμένη από λωρίδες μαύρης αυτοκόλλητης ταινίας μεγάλου πλάτους (τύπου duct tape) με σκοπό να επιτευχθεί, το χρήσιμο για την παρατήρηση των ιχνών συμπυκνώσεως, μαύρο χρώμα. Προκειμένου ο χρήστης να μπορεί να απομακρύνει εύκολα, αν χρειάζεται, τη λαμαρίνα από τον ξηρό πάγο, τοποθετήθηκαν στα άκρα μιας διαγωνίου της δύο λαβές - κρίκοι με περαστούς κοχλίες σύσφιξης και παξιμάδια. Μια φωτογραφία αυτής της λαμαρίνας μέσα στο δοχείο του ξηρού πάγου διακρίνεται στην Εικόνα 4.27. Ο θάλαμος A

² Προμηθευτής ξηρού πάγου: ENSEN Ξηρός Πάγος ΟΕ, Σαραντόγλου 21, Νέα Φιλαδέλφεια, 14342 Αθήνα, τηλ. 2121002197

τοποθετήθηκε με το άνοιγμα προς τα κάτω πάνω στην μαύρη επιφάνεια της λαμαρίνας. Η διάταξη του πειράματος φαίνεται σε αναπαράσταση στην Εικόνα 4.28.



Εικόνα 4.27: Ψυχόμενη μεταλλική επιφάνεια από αλουμίνιο καλυμμένη με μαύρη μονωτική ταινία για τη δοκιμή #A4.



Εικόνα 4.28: Η διάταξη της δοκιμής #A4 σε αναπαράσταση. Άνω: με φωτισμό δωματίου. Κάτω: με φωτισμό πειράματος.

Σχόλια και συμπεράσματα:

(1) Η ορατότητα προς το εσωτερικό του θαλάμου ήταν ευκολότερη από τις προηγούμενες δοκιμές επειδή δεν δημιουργήθηκε μεγάλη ποσότητα ατμών από την εξάχνωση του ξηρού πάγου. Επίσης η θολότητα λόγω συμπύκνωσης ατμοσφαιρικής υγρασίας στα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου ήταν λιγότερη. Τέλος, την ορατότητα στην περιοχή κοντά στο

ψυχόμενο δάπεδο, την περιοχή δηλαδή ενδιαφέροντος για παρατήρηση ιχνών, δεν εμποδίζουν πλευρικά τοιχώματα.

(2) Διαπιστώθηκε ότι η μαύρη ταινία με την οποία καλύφθηκε το ψυχόμενο δάπεδο αλλοιώνεται (μαλακώνει) με την ψύξη ή/και με την ισοπροπυλική αλκοόλη. Είναι πιθανό επίσης ότι λόγω της αλλοίωσης της ταινίας να υπάρχει διαρροή χρησιμων ατμών στο ψυχόμενο δάπεδο.

(3) Η έλλειψη παραγωγής ιχνών αποδόθηκε στο ότι: (3α) ο θάλαμος Α έχει μειονεκτήματα που έχουν ήδη αναφερθεί, (3β) υπήρχαν διαρροές νέφους από τη διεπαφή θαλάμου και ψυχόμενου δαπέδου, (3γ) Η πηγή Sr-90 εκπέμπει ηλεκτρόνια μεγάλης ενέργειας (3δ) Η πηγή Sr-90 (5 μCi) είναι ακατάλληλα μικρής ραδιενέργειας για τις δοκιμές.

(4) Ο θάλαμος Α δεν επιτρέπει παρατηρήσεις από την οροφή.

4.7 Σχόλια και συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφηκαν αναγκαίες κατασκευές και μία πρώτη φάση πειραματικών δοκιμών προκειμένου να προκύψει ένας απλός και εύχρηστος καθοδικός θάλαμος νεφώσεως τύπου διάχυσης ο οποίος να παράγει ίχνη συμπυκνώσεως οφειλόμενα σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με θάλαμο από διαφανές ακρυλικό πλαστικό. Κατά κανόνα δεν παρατηρήθηκαν ίχνη, το πιθανότερο, όχι γιατί δεν δημιουργήθηκαν αλλά κυρίως διότι η ορατότητα ήταν περιορισμένη για διάφορες αιτίες. Για παράδειγμα δεν διευκόλυναν τα νέφη αζώτου, τα νέφη από συμπυκνωμένη υγρασία της ατμόσφαιρας, θολότητα λόγω συμπύκνωσης υγρασίας στα εξωτερικά τοιχώματα του θαλάμου, τα κατακόρυφα τοιχώματα των δοχείων γύρω από το ψυχόμενο δάπεδο και η αδυναμία παρατήρησης από την οροφή. Επιπλέον ο διαχεόμενος ατμός της αλκοόλης σχημάτιζε νέφος τύπου ευαίσθητης περιοχής σε πολύ χαμηλό ύψος πάνω από την ψυχόμενη επιφάνεια. Υπολογίζεται ότι για αυτό οι αιτίες ήταν: τα λεπτά τοιχώματα του θαλάμου των πειραμάτων που προάγουν τη συναγωγή, οι διαρροές στη διεπαφή του θαλάμου με το ψυχόμενο δάπεδο και τέλος, η πάρα πολύ έντονη βαθμίδα μείωσης της θερμοκρασίας μεταξύ ψυχόμενου δαπέδου και οροφής του θαλάμου σε ό,τι αφορά στα πειράματα #A1 έως και #A3. Στο επόμενο Κεφάλαιο 5, ολοκληρώθηκαν δοκιμές με το θάλαμο Β, ο οποίος συγκροτήθηκε με πρότυπο τον θάλαμο CRC-DC της CloudChambersDotCom. Για τις δοκιμές αυτές χρησιμοποιήθηκε νέα κατασκευή για ψυχόμενο δάπεδο με υγρό άζωτο, η οποία δεν προάγει, τα νέφη, ούτε τον πάγο, ούτε έχει τοιχώματα που εμποδίζουν την ορατότητα. Σκοπός της δεύτερης ομάδας δοκιμών ήταν να κατανοηθούν και, στο βαθμό που είναι δυνατόν, να

αρθούν τα εμπόδια που συνολικά παρατηρήθηκαν κατά την πρώτη ομάδα δοκιμών του Κεφαλαίου 4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΘΑΛΑΜΟ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΨΥΧΟΜΕΝΟ ΜΕ ΥΓΡΟ ΑΖΩΤΟ - ΔΟΚΙΜΕΣ Β' ΦΑΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα και με τα όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα υπάρχουν αρκετές τεχνικές προϋποθέσεις που πρέπει να ικανοποιούνται για να κατασκευαστεί ένας απλός λειτουργικός και εύχρηστος καθοδικός θάλαμος νεφώσεως τύπου διάχυσης. Στο προηγούμενο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιήθηκε μία σειρά από σχετικές δοκιμές (Α' φάσης), στις οποίες δόθηκε έμφαση σε διάφορους τρόπους ψύξης με υγρό άζωτο, το οποίο είναι ένα από τα ζητούμενα στη Διπλωματική Εργασία. Δίνοντας βάρος σε αυτό το χαρακτηριστικό προέκυψε ότι αγνοήθηκαν άλλες απαιτήσεις, όπως π.χ. η ανάγκη για όσο το δυνατόν καλύτερα μονωμένο θάλαμο, η ανάγκη για καλή ορατότητα και η ανάγκη για όσο το δυνατόν λιγότερες διαρροές από το μίγμα ατμών - αερίου. Επιπλέον δημιουργήθηκε και η εύλογη υποψία ότι η βαθμίδα μείωσης της θερμοκρασίας κατά το ύψος του θαλάμου, λόγω της ψύξεως με υγρό άζωτο είναι ανεπιθύμητα μεγάλη με αποτέλεσμα η ευαίσθητη περιοχή του θαλάμου να εμφανίζεται πολύ κοντά στο ψυχόμενο δάπεδο. Στο παρόν Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται μια επόμενη σειρά από δοκιμές (Β' φάσης), στις οποίες δίνεται η αναγκαία προσοχή στα προβλήματα που εντοπίστηκαν στην Α' φάση. Για το σκοπό αυτό οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με το θάλαμο Β, ο οποίος συγκροτήθηκε με πρότυπο τον θάλαμο CRC-DC της CloudChambersDotCom. Ο τρόπος κατασκευής αυτού του θαλάμου δόθηκε στο Κεφάλαιο 4. Ο θάλαμος αυτός προσφέρει παχύτερα τοιχώματα από ακρυλικό πλαστικό, άρα καλύτερη μόνωση έναντι συναγωγής και καλύτερη ορατότητα μέσω της αποσπώμενης διαφανούς οροφής. Επιπλέον για τις δοκιμές αυτές χρησιμοποιήθηκε ειδική κατασκευή για το ψυχόμενο δάπεδο με υγρό άζωτο, η οποία δεν προάγει, τα νέφη, ούτε τον πάγο, ούτε έχει τοιχώματα που εμποδίζουν την ορατότητα. Ο τρόπος κατασκευής αυτού του ψυχόμενου δαπέδου δόθηκε στο Κεφάλαιο 4. Στις δοκιμές αυτές κατανοήθηκαν και αντιμετωπίστηκαν και τα θέματα διαρροών του μίγματος από το εσωτερικό του θαλάμου προς το περιβάλλον.

5.2 Δοκιμές - Φάση Β'

Για τη Β φάση των δοκιμών λήφθηκαν υπόψη τα παρακάτω, όπως προέκυψαν από τις δοκιμές της φάσης Α:

(α) Τα μειονεκτήματα του θαλάμου A και κυρίως το ότι δεν έχει ορατότητα από την οροφή και ότι τα τοιχώματά του είναι μικρού πάχους και προάγουν τη συναγωγή. Προκρίθηκε η αντικατάστασή του από τον θάλαμο B (βλ. και τα αναφερόμενα στην ενότητα 4.5.2), ο οποίος μοιάζει αρκετά με τον μικρό θάλαμο της CloudChambersDotCom.

(β) Τα μειονεκτήματα της ψύξης με υγρό άζωτο όπως εφαρμόστηκε στη φάση A. Με τους τρόπους που δοκιμάστηκαν στη φάση A, δεν υπήρχε καλός έλεγχος της ροής, πολύ άζωτο εξαχνώνονταν ανεξέλεγκτα προς το γειτονικό προς την πειραματική διάταξη περιβάλλον, εμποδίζοντας οπτικά και λειτουργικά το πείραμα με ατμούς εξάχνωσης, νέφη από συμπυκνωμένη υγρασία της ατμόσφαιρας και σχηματισμό πάγου. Επιπλέον οι απόπειρες καλύτερου ελέγχου της ροής αζώτου κυρίως με το σύστημα "δοχείο μέσα σε δοχείο" που έγιναν στο πλαίσιο των δοκιμών #A2 και #A3, εμπόδιζαν την ορατότητα στο θάλαμο λόγω του ύψους των πλευρικών τοιχωμάτων των δοχείων αυτών. Προκρίθηκε η εφαρμογή του ψυχόμενου δαπέδου με υγρό άζωτο όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.3.2.

(α) Δοκιμή #B1

Χαρακτηριστικά δοκιμής:

Ψυχόμενο δάπεδο: με υγρό άζωτο (με τη διάταξη της ενότητας 4.3.2), το άζωτο παρέχεται με πίεση από το δοχείο μεταφοράς των 30 L (βλ. Κεφάλαιο 3), Θάλαμος: B, Πηγή φωτός: προβολέας διαφανειών με διάφραγμα, βλ. σχετικά δοκιμή #A2, Ατμοί: από μίγμα αιθανόλης - νερού 95%, Πηγή: Sr-90 5μCi ή 185 kBq, τοποθετημένη στο εσωτερικό του θαλάμου.

Σκοπός δοκιμής:

Αντιμετώπιση προβλημάτων σειράς δοκιμών φάσης A', έλεγχος των διαρροών

Αποτελέσματα δοκιμής:

Παρατηρήθηκε αραιό αλλά σχεδόν ικανοποιητικό νέφος και λίγα ίχνη από ηλεκτρόνια μεγάλης κινητικής ενέργειας. Εξασφαλίστηκε ικανοποιητική ορατότητα. Λήφθηκαν φωτογραφίες ιχνών.

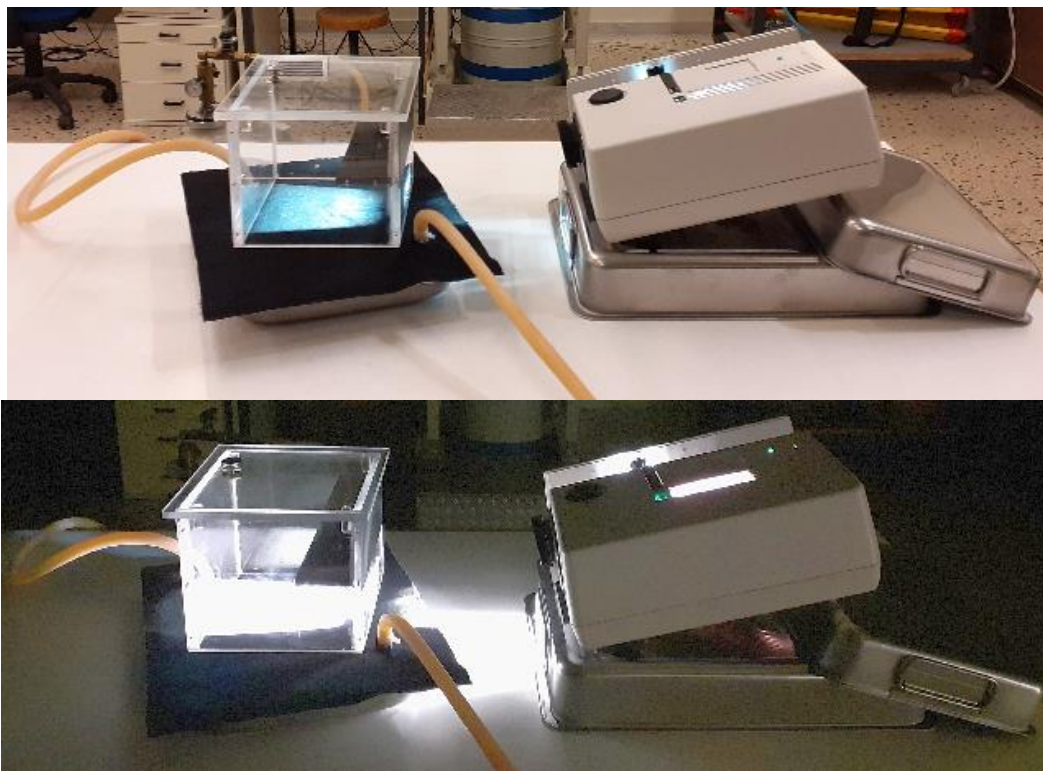
Περιγραφή δοκιμής και παρατηρήσεις:

Το ψυχόμενο δάπεδο που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.3.2 καλύφθηκε με λωρίδες μαύρης αυτοκόλλητης ταινίας μεγάλου πλάτους (τύπου duct tape) με σκοπό να επιτευχθεί, το χρήσιμο για την παρατήρηση των ιχνών συμπυκνώσεως, μαύρο χρώμα. Το δάπεδο απέκτησε τη μορφή της Εικόνας 5.1.



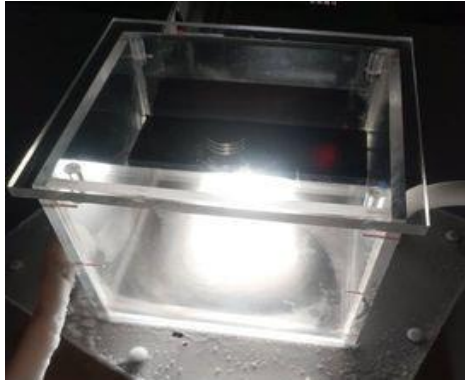
Εικόνα 5.1: Μαύρη επιφάνεια για το ψυχόμενο δάπεδο της δοκιμής #B1

Ο θάλαμος B τοποθετήθηκε στο ψυχόμενο δάπεδο με το άνοιγμα προς τα κάτω. Για τον έλεγχο των διαρροών ο θάλαμος στεγανοποιήθηκε, στα σημεία επαφής του με το ψυχόμενο δάπεδο, με σιλικόνη. Ασφαλώς η δοκιμή πραγματοποιήθηκε μετά τον πολυμερισμό της σιλικόνης και αφού διαπιστώθηκε ικανοποιητική στεγανότητα πλημμυρίζοντας το θάλαμο με αιθανόλη. Η αναγκαία αιθανόλη για το πείραμα τοποθετήθηκε στο θάλαμο με ψεκασμό από την οροφή, σύμφωνα με τον τρόπο που επιδείχθηκε με χρήση του θαλάμου της ΕΕΑΕ. Η διάταξη του πειράματος φαίνεται σε αναπαράσταση στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2: Η διάταξη της δοκιμής #B1 σε αναπαράσταση.
Άνω: με φωτισμό δωματίου. Κάτω: με φωτισμό πειράματος.

Φωτογραφία από τη δοκιμή #B1 δίνεται στην Εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3: Φωτογραφία από τη δοκιμή #B1.

Σχόλια και συμπεράσματα:

(1) Η ορατότητα προς το εσωτερικό του θαλάμου ήταν εύκολη επειδή δεν δημιουργήθηκε μεγάλη ποσότητα ατμών από την εξάχνωση του υγρού αζώτου ή από νέφη λόγω συμπυκνώσεως υγρασίας. Στην περιφέρεια του ψυχόμενου δαπέδου και γύρω από το δοχείο υγρού αζώτου από κάτω σχηματίστηκε πάγος. Την ορατότητα στην περιοχή κοντά στο ψυχόμενο δάπεδο, την περιοχή δηλαδή ενδιαφέροντος για παρατήρηση ίχνων, δεν εμποδίζουν πλευρικά τοιχώματα. Επιπλέον η παρατήρηση μπορεί να γίνεται και από τη διαφανή οροφή.

(2) Διαπιστώθηκε ότι η μαύρη ταινία με την οποία καλύφθηκε το ψυχόμενο δάπεδο αλλοιώνεται (μαλακώνει) με την ψύξη ή/και με την αλκοόλη. Είναι πιθανό επίσης ότι λόγω της αλλοίωσης της ταινίας να υπάρχει διαρροή χρήσιμων ατμών στο ψυχόμενο δάπεδο.

(3) Τα λίγα ίχνη αποδόθηκαν κυρίως στο αραιό νέφος (βλ. Εικόνα 5.4). Η φωτογραφία της Εικόνας 5.4 έχει υποστεί ψηφιακή επεξεργασία για τη βελτίωση της αντίθεσης. Το νέφος σχηματίστηκε με ικανοποιητικότερο τρόπο διότι με τη στεγάνωση με τη σιλικόνη περιορίστηκαν πολύ οι διαρροές. Σημειώνεται ότι η στεγάνωση με σιλικόνη δεν ήταν 100% επιτυχής διότι, προφανώς, η έντονη ψύξη σε χαμηλή θερμοκρασία αλλοίωσε τη συνάφεια της σιλικόνης λόγω των έντονων συστολών.



Εικόνα 5.4: Ίχνη ηλεκτρονίων μεγάλης κινητικής ενέργειας από πηγή Sr-90 κατά τη δοκιμή #B1.

(β) Δοκιμή #B2

Χαρακτηριστικά δοκιμής:

Ψυχόμενο δάπεδο: με υγρό άζωτο (με τη διάταξη της ενότητας 4.3.2), το άζωτο παρέχεται με πίεση από το δοχείο μεταφοράς των 30 L (βλ. Κεφάλαιο 3), Θάλαμος: B, Πηγή φωτός: προβολέας διαφανειών με διάφραγμα, βλ. σχετικά δοκιμή #A2, Ατμοί: από μίγμα αιθανόλης - νερού 95%, Πηγή: Sr-90 5μCi ή 185 kBq, τοποθετημένη στο εσωτερικό του θαλάμου.

Σκοπός δοκιμής:

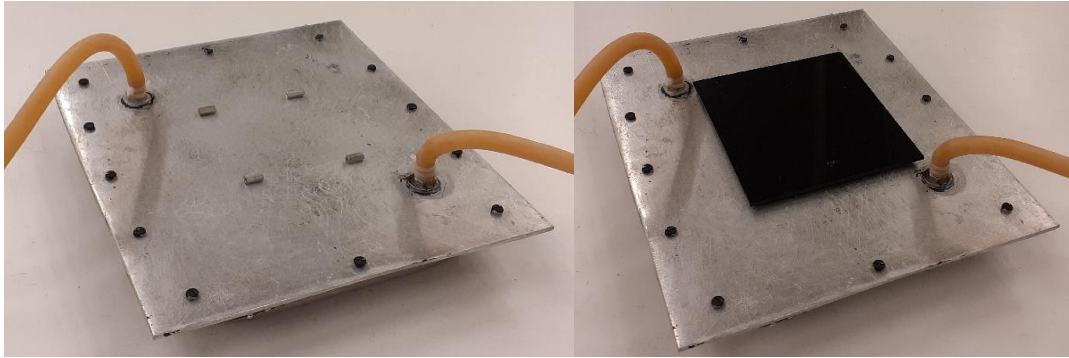
Βελτίωση δοκιμής #B1, έλεγχος των διαρροών, ελάττωση της βαθμίδας μείωσης της θερμοκρασίας κατά το ύψος, σχηματισμός νέφους σε κατάλληλο ύψος

Αποτελέσματα δοκιμής:

Παρατηρήθηκε νέφος τα χαρακτηριστικά του οποίου ήταν αρκετά ιδιαίτερα και θα σχολιασθούν στη συνέχεια. Δεν παρατηρήθηκαν ίχνη. Εξασφαλίσθηκε ικανοποιητική ορατότητα. Λήφθηκαν φωτογραφίες ανομοιόμορφου νέφους.

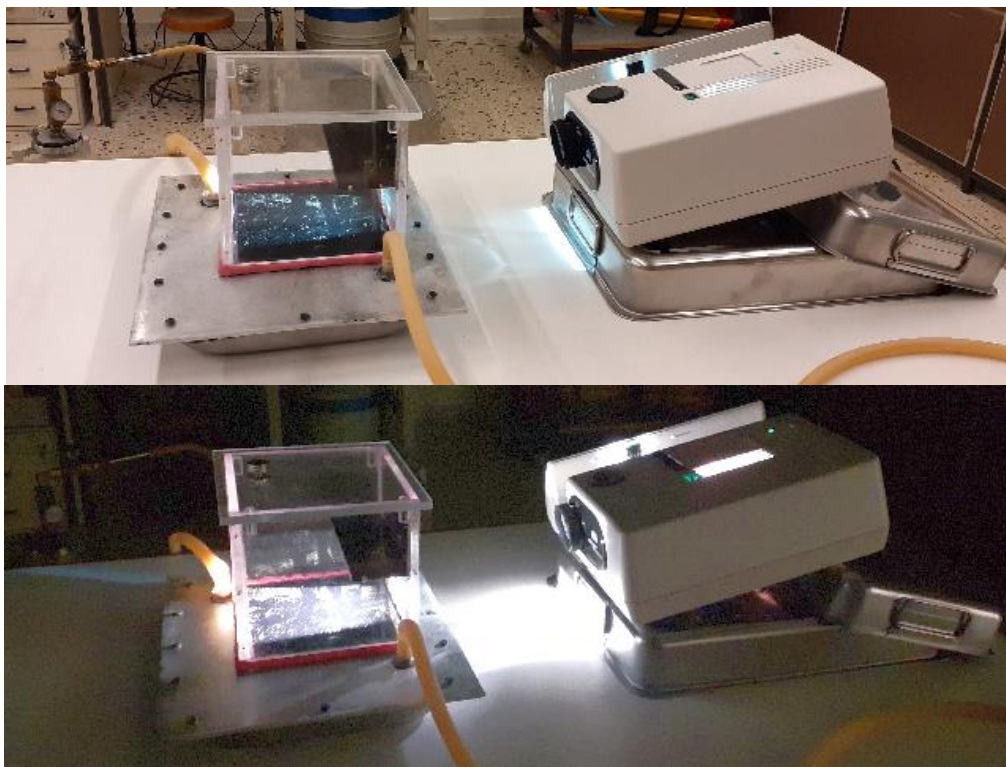
Περιγραφή δοκιμής και παρατηρήσεις:

Αφαιρέθηκαν οι μαύρες αυτοκόλλητες ταινίες από το ψυχόμενο δάπεδο κυρίως διότι φαίνεται ότι αλλοιώνονται από το ψύχος (βλ. και δοκιμή #A4, Κεφάλαιο 4). Στο ψυχόμενο δάπεδο τοποθετήθηκε μία επιφάνεια από Plexiglass μαύρου χρώματος με πάχος 3 mm και διαστάσεις 17.5×15.5 cm, πάνω σε μεταλλικούς αποστάτες. Η επιφάνεια του Plexiglass ήταν τέτοια ώστε να χωράει στο εσωτερικό του θαλάμου B. Για την κατανόηση της γεωμετρίας του Plexiglass πάνω στο ψυχόμενο δάπεδο, βλ. την Εικόνα 5.5.



Εικόνα 5.5: Τροποποιημένο δάπεδο Plexiglass για τη δοκιμή #B2 σε αναπαράσταση.
Αριστερά: μεταλλικοί αποστάτες. Δεξιά: το Plexiglass πάνω στους αποστάτες

Ο θάλαμος Β στο ψυχόμενο δάπεδο τοποθετήθηκε με το άνοιγμα προς τα κάτω. Για τον έλεγχο των διαρροών ο θάλαμος στεγανοποιήθηκε, στα σημεία επαφής του με το ψυχόμενο δάπεδο, με πλαστελίνη. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε αφού διαπιστώθηκε ικανοποιητική στεγανότητα πλημμυρίζοντας το θάλαμο με αιθανόλη. Η σιλικόνη εγκαταλείφθηκε ως στεγανωτικό διότι δεν αφαιρείται εύκολα για επόμενες δοκιμές. Η αναγκαία αιθανόλη για το πείραμα τοποθετήθηκε στο θάλαμο με ψεκασμό από την οροφή, σύμφωνα με τον τρόπο που επιδείχθηκε με χρήση του θαλάμου της ΕΕΑΕ. Η διάταξη του πειράματος φαίνεται σε αναπαράσταση στην Εικόνα 5.6.



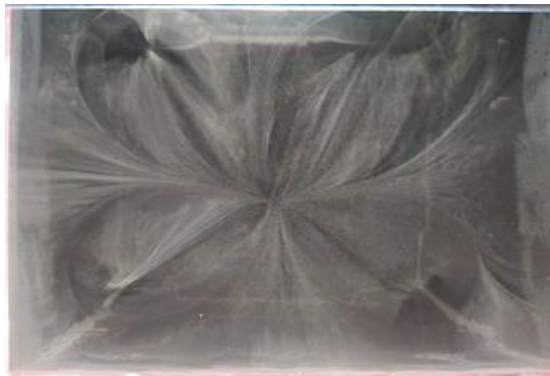
Εικόνα 5.6: Η διάταξη της δοκιμής #B2 σε αναπαράσταση.
Άνω: με φωτισμό δωματίου. Κάτω: με φωτισμό πειράματος.
Το ροζ παρέμβυσμα είναι από πλαστελίνη.

Σχόλια και συμπεράσματα:

(1) Η ορατότητα προς το εσωτερικό του θαλάμου ήταν εύκολη παρόμοια όπως στη δοκιμή #B1.

(2) Παρατηρήθηκε έντονο νέφος σε μεγαλύτερη απόσταση από το ψυχόμενο δάπεδο από ό,τι στις προηγούμενες δοκιμές φάσης A' και φάσης B'. Το νέφος σχηματίστηκε με ικανοποιητικότερο τρόπο διότι με τη στεγάνωση με την πλαστελίνη περιορίστηκαν πολύ οι διαρροές. Επιπλέον η απόσταση από το ψυχόμενο δάπεδο που δημιούργησε το πρόσθετο δάπεδο από Plexiglass ελάττωσε τη βαθμίδα μείωσης της θερμοκρασίας κατά το ύψος. Σημειώνεται ότι η στεγάνωση με πλαστελίνη δεν ήταν 100% επιτυχής διότι, προφανώς, η έντονη ψύξη σε χαμηλή θερμοκρασία αλλοίωσε τη συνάφεια της σιλικόνης λόγω των έντονων συστολών.

(3) Το νέφος που παρατηρήθηκε δεν ήταν ομοιόμορφο και διακρίνεται στη φωτογραφία της Εικόνας 5.5. Η ανομοιομορφία οφείλεται στο ότι κάτω από το μαύρο Plexiglass και εξαιτίας των μεταλλικών αποστατών το πεδίο θερμοκρασιών δεν ήταν ομοιόμορφο. Η έλλειψη παραγωγής ιχνών αποδόθηκε κυρίως στην ανομοιομορφία του νέφους.



Εικόνα 5.7: Ανομοιόμορφο νέφος από τη δοκιμή #B2

(γ) Δοκιμή #B3

Χαρακτηριστικά δοκιμής:

Ψυχόμενο δάπεδο: με υγρό άζωτο (με τη διάταξη της ενότητας 4.3.2), το άζωτο παρέχεται με πίεση από το δοχείο μεταφοράς των 30 L (βλ. Κεφάλαιο 3), Θάλαμος: B, Πηγή φωτός: προβολέας διαφανειών με διάφραγμα, βλ. σχετικά δοκιμή #A2, Ατμοί: από μίγμα αιθανόλης - νερού 95%, Πηγή: -α σωματίδια από ηλεκτρόδια συγκόλλησης TIG τύπου βολφραμίου - θορίου 2%.

Σκοπός δοκιμής:

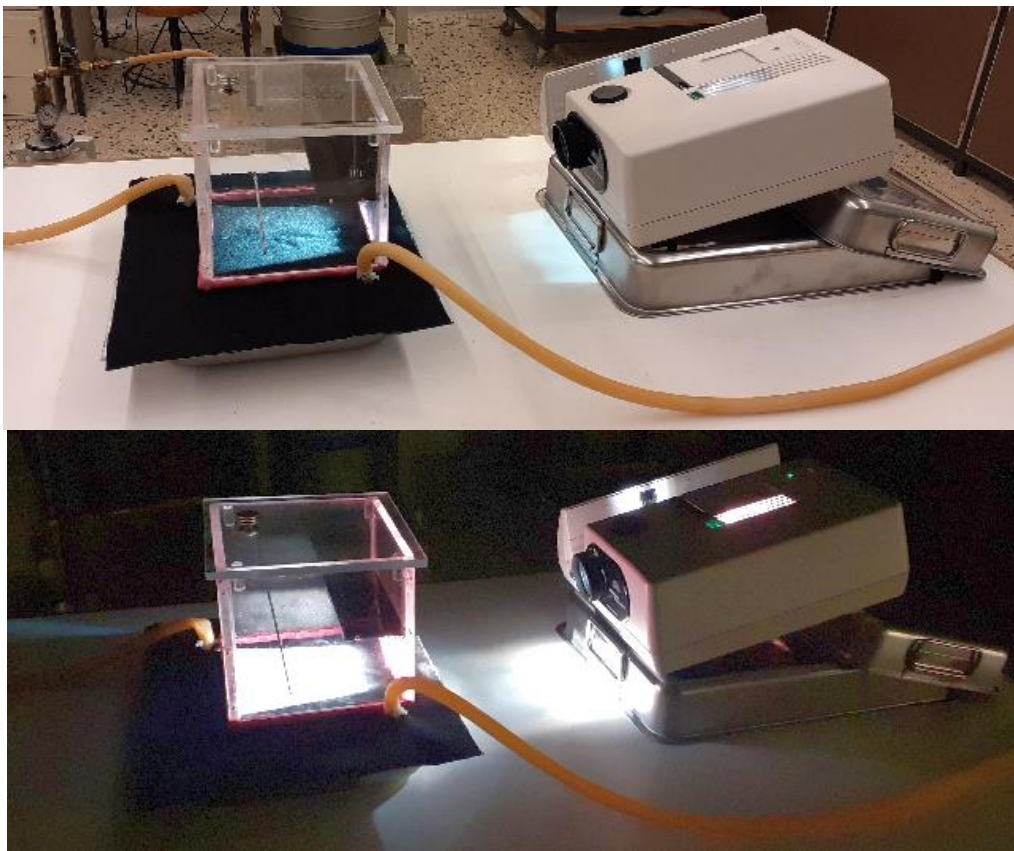
Βελτίωση δοκιμής #B1, διαπίστωση ιχνών από -α σωματίδια

Αποτελέσματα δοκιμής:

Παρατηρήθηκε αραιό αλλά σχεδόν ικανοποιητικό νέφος και ίχνη από -α σωματίδια παραγόμενα από το Th-232 της πηγής. Εξασφαλίσθηκε ικανοποιητική ορατότητα. Λήφθηκαν φωτογραφίες ιχνών.

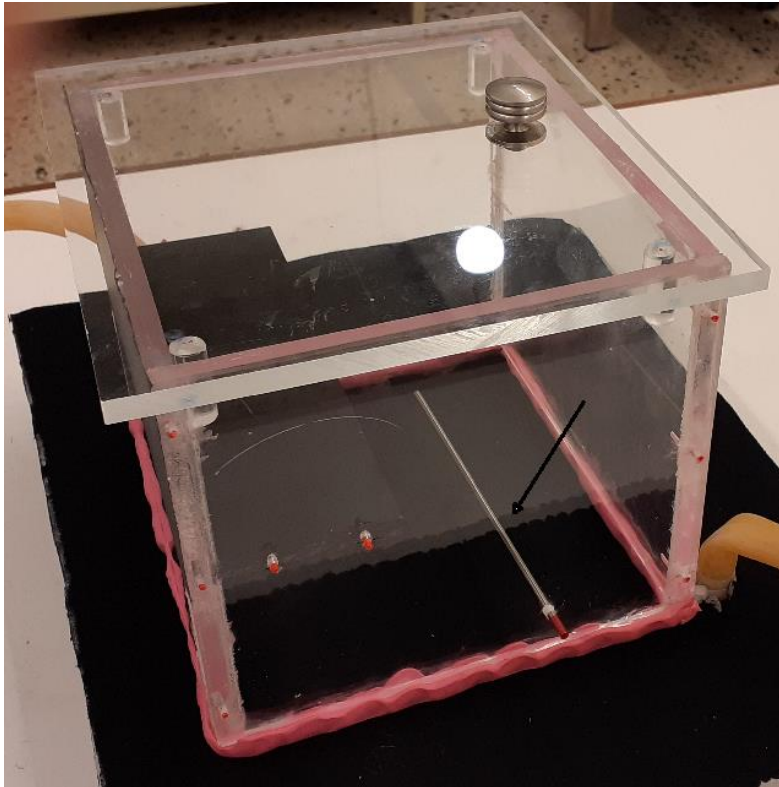
Περιγραφή δοκιμής και παρατηρήσεις:

Το ψυχόμενο δάπεδο καλύφθηκε με μαύρο "ματ" αυτοκόλλητο. Ο θάλαμος Β στο ψυχόμενο δάπεδο τοποθετήθηκε με το άνοιγμα προς τα κάτω. Για τον έλεγχο των διαρροών ο θάλαμος στεγανοποιήθηκε, στα σημεία επαφής του με το αυτοκόλλητο, με πλαστελίνη. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε αφού διαπιστώθηκε ικανοποιητική στεγανότητα πλημμυρίζοντας το θάλαμο με αιθανόλη. Η αναγκαία αιθανόλη για το πείραμα τοποθετήθηκε στο θάλαμο με ψεκασμό από την οροφή, σύμφωνα με τον τρόπο που επιδείχθηκε με χρήση του θαλάμου της ΕΕΑΕ. Η διάταξη του πειράματος φαίνεται σε αναπαράσταση στην Εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8: Η διάταξη της δοκιμής #B3 σε αναπαράσταση.
Άνω: με φωτισμό δωματίου. Κάτω: με φωτισμό πειράματος.
Το ροζ παρέμβυσμα είναι από πλαστελίνη.

Στη φωτογραφία της Εικόνας 5.9 φαίνεται το πώς τοποθετήθηκε η πηγή από το μικρό άνοιγμα σε ένα πλευρό του θαλάμου.



Εικόνα 5.9: Η αξονική πηγή -α σωματιδίων τοποθετημένη στο θάλαμο για τη δοκιμή #B3

Σχόλια και συμπεράσματα:

- (1) Η ορατότητα προς το εσωτερικό του θαλάμου ήταν εύκολη παρόμοια όπως στη δοκιμή #B1.
- (2) Διαπιστώθηκε ότι το μαύρο αυτοκόλλητο με το οποίο καλύφθηκε το ψυχόμενο δάπεδο αλλοιώνεται (μαλακώνει) με την ψύξη ή/και με την αλκοόλη.
- (3) Τα λίγα ίχνη αποδόθηκαν κυρίως στο αραιό νέφος (βλ. Εικόνα 5.10). Η φωτογραφία της Εικόνας 5.10 έχει υποστεί ψηφιακή επεξεργασία για τη βελτίωση της αντίθεσης. Το νέφος σχηματίστηκε με ικανοποιητικότερο τρόπο διότι με τη στεγάνωση με την πλαστελίνη περιορίστηκαν πολύ οι διαρροές. Σημειώνεται ότι η στεγάνωση με πλαστελίνη δεν ήταν 100% επιτυχής διότι, προφανώς, η έντονη ψύξη σε χαμηλή θερμοκρασία αλλοίωσε τη συνάφεια της σιλικόνης λόγω των έντονων συστολών.



Εικόνα 5.10: Ίχνη -α σωματιδίων από ηλεκτρόδιο που περιέχει Th-232 κατά τη δοκιμή #B3.

5.3 Προτεινόμενη τελική δοκιμή

Συμπεράσματα από τις δοκιμές της Β' φάσης

Θετικά:

Θ1 Υπάρχει ικανοποιητική ορατότητα

Θ2 Διαπιστώνονται ίχνη τόσο από - β όσο και από -α σωματίδια.

Θ3 Παρατηρήθηκε έντονο νέφος σε μεγαλύτερη απόσταση από το ψυχόμενο δάπεδο μόνο κατά τη δοκιμή #B2 στην οποία η βαθμίδα μείωσης της θερμοκρασίας κατά το ύψος δεν ήταν τόσο μεγάλη όσο στις άλλες δοκιμές.

Ουδέτερα ή αρνητικά

A1 Το νέφος στο οποίο σχηματίζονται τα ίχνη είναι αραιό και διαμορφώνεται σε μικρό ύψος από το ψυχόμενο δάπεδο. Για αυτό και τα ίχνη είναι λίγα και δύσκολο να παρατηρηθούν

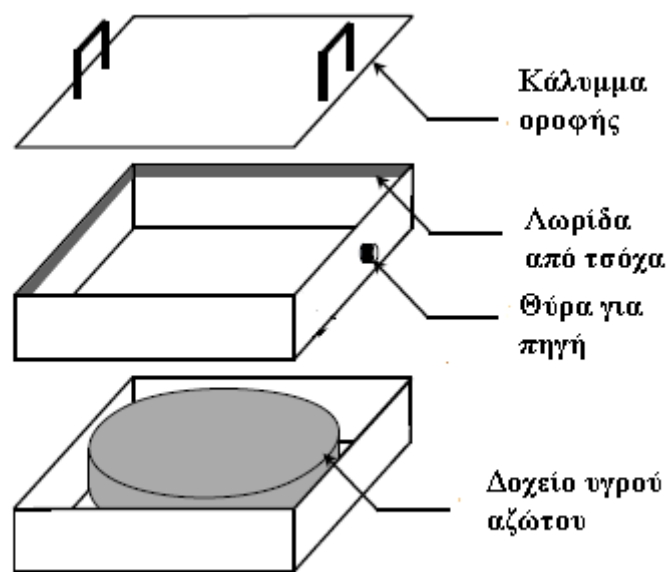
A2 Το ψυχόμενο δάπεδο παγώνει γύρω από το θάλαμο

Προτάσεις για την ενίσχυση των θετικών συμπερασμάτων

Π1 Καλή και μόνιμη στεγάνωση του δαπέδου του θαλάμου.

Παρόλα τα όσα αναφέρονται σε αρκετές από τις πρόχειρες ή απλές υλοποιήσεις καθοδικών θαλάμων νεφώσεως τύπου διάχυσης, φαίνεται ότι οι διαρροές που μπορεί να υπάρχουν στη διεπαφή του θαλάμου με το ψυχόμενο δάπεδο εμποδίζουν το σχηματισμό καλού νέφους ατμών αλκοόλης στον αέρα. Για να επιτευχθεί η στεγάνωση αρκεί στο θάλαμο Β να προσκολληθεί πάτωμα από Plexiglass πάχους 3

mm. Το πάτωμα καλό θα είναι να είναι μαύρο για τη βελτίωση της αντίθεσης της οπτικής ή της φωτογραφικής παρατήρησης. Η προσκόλληση μπορεί να γίνει με ταινία διπλής όψης. Η στεγάνωση μπορεί να γίνει με σιλικόνη. Σύμφωνα με αυτή την πρόταση, η πειραματική διάταξη θα μοιάζει πολύ με αυτή που δείχνει ο Clark (2019) και φαίνεται στην Εικόνα 5.11. Το πάτωμα του θαλάμου που θα δημιουργηθεί με τον τρόπο αυτό απαλλάσσει τον πειραματιστή από το να χρωματίζει μαύρη την ψυχόμενη επιφάνεια, όπως π.χ. με χρώμα, ή με κάλυψη από λωρίδες από μαύρες πλαστικές ταινίες ή με μαύρο πλαστικό αυτοκόλλητο. Υπενθυμίζεται ότι τα υλικά αυτά καταστρέφονται από τις αλκοόλες σε χαμηλή θερμοκρασία.



Εικόνα 5.11: Πειραματική διάταξη του Clark (2019) για θάλαμο νεφώσεως ψυχόμενο με υγρό άζωτο.

Π2 Μικρότερη βαθμίδα μείωσης της θερμοκρασίας κατά το ύψος.

Ήδη εφαρμόζοντας την πρόταση Π1, ο θάλαμος Β τοποθετείται στο ψυχόμενο δάπεδο με τρόπο ώστε να το δάπεδό του από Plexiglass, να βρίσκεται σε επαφή με τη διάταξη της επιφάνειας του ψυχόμενου δαπέδου. Αυτό από μόνο του δημιουργεί συνθήκες ελάττωσης της κατώτερης θερμοκρασίας του δαπέδου του θαλάμου και άρα ελάττωσης της βαθμίδας μείωσης της θερμοκρασίας κατά το ύψος.

Π3 Περιορισμός του σχηματισμού πάγου γύρω από το θάλαμο.

Για να σταματήσει ο σχηματισμός πάγου γύρω από το θάλαμο εξαιτίας της ψύξης με υγρό άζωτο και για να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο η ορατότητα περιορίζοντας

εντελώς νέφη από υγρασία της ατμόσφαιρας, η επιφάνεια του ψυχόμενου δαπέδου μπορεί να καλυφθεί με δύο ή περισσότερα στρώματα από παχύ ύφασμα (βελούδο ή τσόχα), καλώς διαβρεγμένο με αιθανόλη, η οποία, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζει πολύ χαμηλό σημείο πήξεως και δεν θα παγώσει με το υγρό άζωτο που κυκλοφορεί κάτω από το ψυχόμενο δάπεδο.

Π4 Μέριμνα για ομοιόμορφη θερμοκρασία στο πάτωμα του θαλάμου

Είναι φανερό ότι, εφαρμόζοντας την πρόταση Π1, υπάρχει η ισχυρή πιθανότητα η επαφή του πατώματος του θαλάμου με την επιφάνεια του ψυχόμενου δαπέδου να μην είναι τόσο ομοιόμορφη όσο θα έπρεπε, με αποτέλεσμα στην επιφάνεια του πατώματος να δημιουργούνται ανομοιόμορφα πεδία θερμοκρασίας και το νέφος να αποκτά να παράγεται ανομοιόμορφα (βλ. και την χαρακτηριστική Εικόνα 5.7). Παρόλα αυτά, εφαρμόζοντας ταυτόχρονα και την πρόταση Π3, το παχύ ύφασμα το διαβρεγμένο με αιθανόλη σε δύο ή περισσότερα στρώματα, το οποίο θα μεσολαβήσει μεταξύ της επιφάνειας του ψυχόμενου δαπέδου και της εξωτερικής επιφάνειας του πατώματος του θαλάμου, εξασφαλίζει την καλή επαφή που χρειάζεται για την διαμόρφωση ομοιόμορφου πεδίου θερμοκρασίας στο πάτωμα στο εσωτερικό του θαλάμου.

Π5 Σταδιακή τροφοδοσία του θαλάμου με αιθανόλη

Όπως έδειξε και η επίδειξη με θάλαμο νεφώσεως που έγινε στην ΕΕΑΕ, δεν φαίνεται να παίζει ρόλο το πώς τροφοδοτείται ο θάλαμος με αιθανόλη. ως εκ τούτου η τροφοδοσία μπορεί και να γίνεται με ψεκασμό από την οροφή. Παρόλα αυτά οι περισσότεροι προτείνουν μια πιο ομαλή μέθοδο ως εξής (βλ. π.χ. Clark, 2019): Στα εσωτερικά τοιχώματα του θαλάμου στο άνω μέρος και κοντά στην οροφή να επικολλούνται λωρίδες από παχύ ύφασμα (τσόχα ή βελούδο) καλώς διαβρεγμένες με αιθανόλη. Η διαφορά θερμοκρασίας της οροφής σε σχέση με το πάτωμα θα οδηγήσει τους ατμούς της αιθανόλης να διαχυθούν κατά τον επιθυμητό τρόπο στον αέρα του θαλάμου και να σχηματίσουν την ευαίσθητη περιοχή.

Π6 Βελτίωση της παροχής αζώτου στην ψυχόμενη επιφάνεια

Στις δοκιμές Α' και Β' το άζωτο προς την ψυχόμενη επιφάνεια παρέχονταν με πίεση από το δοχείο μεταφοράς χωρητικότητας 30 L (βλ. Κεφάλαιο 3). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα ότι σύντομα το δοχείο μεταφοράς άδειαζε, διότι παρείχε άζωτο προς το δοχείο της ψυχόμενης επιφάνειας με μεγάλους ρυθμούς, χωρίς αυτό να δικαιολογείται από τις απώλειες. Αν εναλλακτικά χρησιμοποιηθεί το δοχείο μεταφοράς

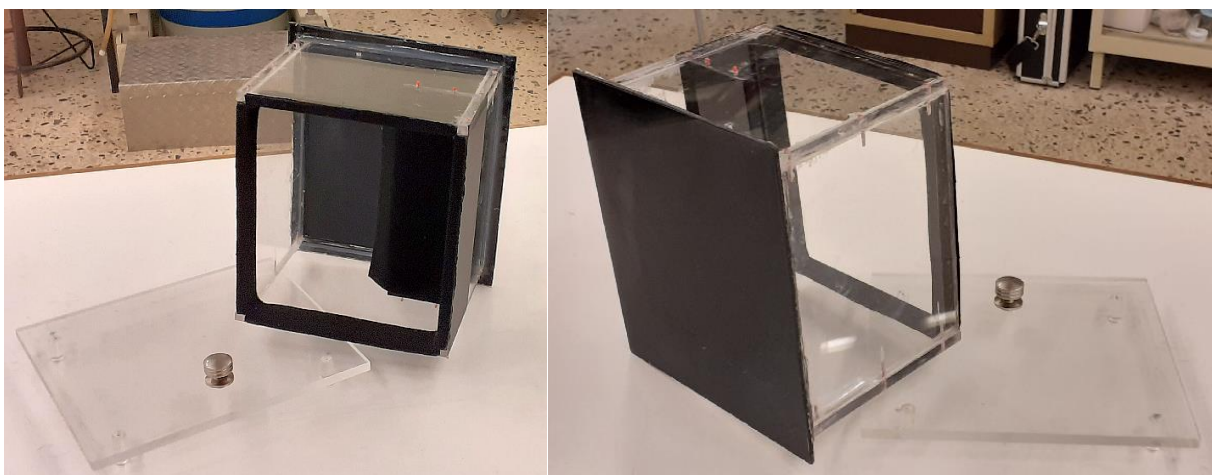
χωρητικότητας 60 L (βλ. Κεφάλαιο 3), το οποίο μεταγγίζει άζωτο με θέρμανση μέσω ηλεκτρικής αντίστασης, η τροφοδοσία αζώτου προς το δοχείο της ψυχόμενης επιφάνειας μπορεί να γίνεται ομαλότερα με τα εξής βήματα: (i) Σύνδεση του δοχείου μεταφοράς με το ακροφύσιο εισόδου με σωλήνα latex, (ii) Έναρξη μετάγγισης με την ενεργοποίηση της ηλεκτρικής αντίστασης, (iii) Πλήρωση του δοχείου της ψυχόμενης επιφάνειας (υγρό άζωτο εξέρχεται από το ακροφύσιο εξόδου), (iv) Διακοπή της ηλεκτρικής τροφοδοσίας στην αντίσταση. Η διακοπή αυτή δεν συνεπάγεται την διακοπή της ροής υγρού αζώτου προς το δοχείο της ψυχόμενης επιφάνειας, διότι το δοχείο μεταφοράς των 60 L έχει πλέον αυτή τη χρονική στιγμή αναπτύξει αρκετή αλλά μικρή πίεση ώστε μια μικρή αυτή τη φορά παροχή να κατευθύνεται προς την ψυχόμενη επιφάνεια, διατηρώντας την ψύξη της στο επιθυμητό θερμοκρασιακό σημείο.

5.4 Υλοποίηση τελικής δοκιμής

Η τελική δοκιμή υλοποιήθηκε σύμφωνα με τις προτάσεις Π1- Π6

Υλοποίηση III Καλή και μόνιμη στεγάνωση του δαπέδου του θαλάμου.

Το πάτωμα του θαλάμου Β, όπως συγκολλήθηκε με ταινία διπλής όψης τύπου VHB Tape 4910F της 3M και στεγανοποιήθηκε με λεπτό στρώμα σιλικόνης διακρίνεται στην Εικόνα 5.12. Προσοχή χρειάζεται, να μην χρησιμοποιηθεί ως συγκολλητικό και ταινία και σιλικόνη, διότι η πρώτη είναι ασύμβατη με τη δεύτερη, όπως αναφέρει η 3M. Η σιλικόνη επομένως χρησιμοποιήθηκε σε δεύτερο βήμα αποκλειστικά για λόγους στεγανοποίησης.



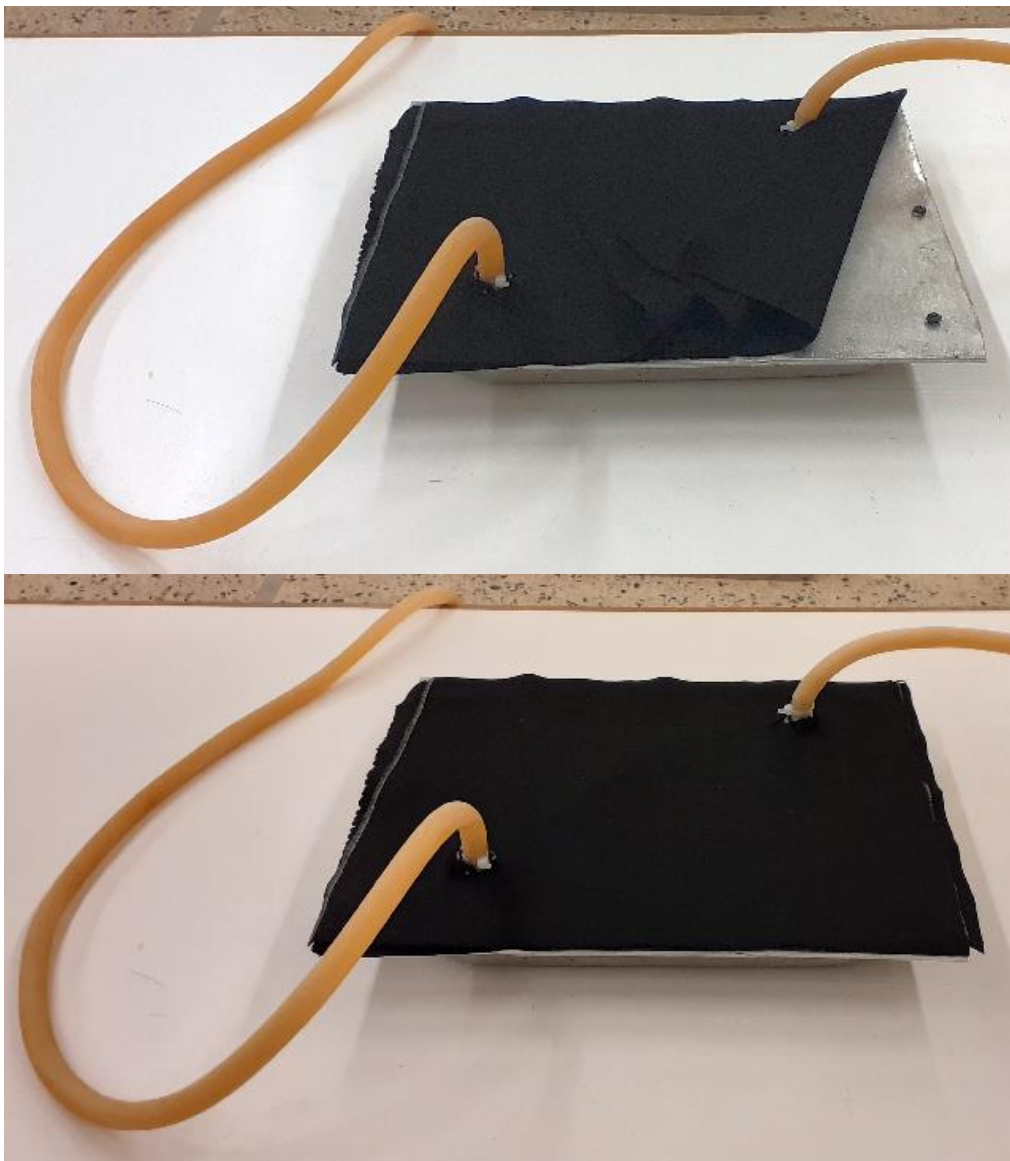
Εικόνα 5.12: Καλή και μόνιμη στεγάνωση του δαπέδου του θαλάμου με πάτωμα από Plexiglass πάχους 3 mm, χρώματος μαύρου. Αριστερά: Όψη του πατώματος από το εσωτερικό του θαλάμου. Δεξιά: Εξωτερική όψη του πατώματος

Υλοποίηση Π2 Μικρότερη βαθμίδα μείωσης της θερμοκρασίας κατά το ύψος.

Η μικρότερη βαθμίδα μείωσης της θερμοκρασίας κατά το ύψος, προκύπτει εμμέσως με την προσθήκη του πατώματος.

Υλοποίηση Π3 Περιορισμός του σχηματισμού πάγου γύρω από το θάλαμο.

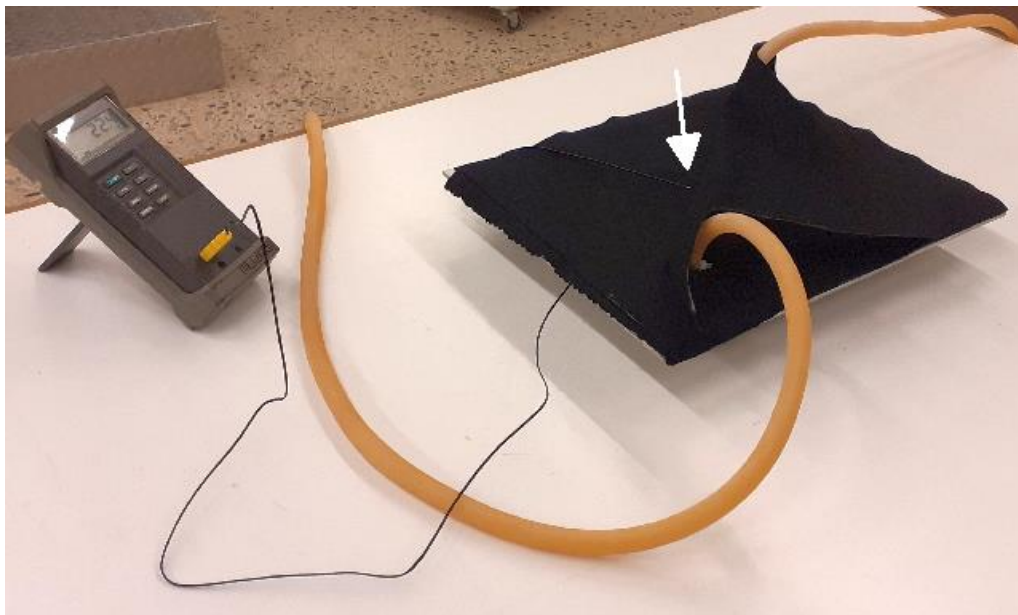
Όπως διακρίνεται και στην φωτογραφία της Εικόνας 5.13, η επιφάνεια του ψυχόμενου δαπέδου καλύφθηκε με τρία φύλλα από παχύ ύφασμα (τσόχα), καλώς διαβρεγμένο με αιθανόλη. Η υλοποίηση Π3, πέρα από τον περιορισμό του σχηματισμού πάγου γύρω από το θάλαμο, βοηθάει σημαντικά και για τη δημιουργία μικρότερης βαθμίδας μείωσης της θερμοκρασίας κατά το ύψος.



Εικόνα 5.13: Η επιφάνεια του ψυχόμενου δαπέδου καλυμμένη με τρία φύλλα από μαύρη τσόχα, καλώς διαβρεγμένη με αιθανόλη.

Υλοποίηση Π4 Μέριμνα για ομοιόμορφη θερμοκρασία στο πάτωμα του θαλάμου

Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, το ζητούμενο ικανοποιείται από την Υλοποίηση Π4. Ανάμεσα στα φύλλα του υφάσματος και κάτω από τη θέση που θα τοποθετηθεί το πάτωμα του θαλάμου, μπορεί να τοποθετηθεί θερμοστοιχείο για την καλύτερη παρακολούθηση του ρυθμού πτώσης της θερμοκρασίας του ψυχόμενου δαπέδου. Αν το κατώτερο στρώμα υφάσματος είναι το με αριθμό 1, τότε το θερμοστοιχείο μπορεί να τοποθετηθεί μεταξύ στρώματος 1 και στρώματος 2, ή, ακόμα καλύτερα, μεταξύ στρώματος 2 και στρώματος 3. Η τοποθέτηση του θερμοστοιχείου μεταξύ στρώματος 3 και πατώματος του θαλάμου δεν συνίσταται διότι θα εμποδίζει την καλύτερη επαφή του πατώματος με το ψυχόμενο δάπεδο. Η τοποθέτηση του θερμοστοιχείου μεταξύ ψυχόμενου δαπέδου και στρώματος 3 δεν συνίσταται επίσης διότι θα καταγράφει στην πραγματικότητα όχι την θερμοκρασία στο πάτωμα του θαλάμου αλλά τη θερμοκρασία της μεταλλικής επιφάνειας του ψυχόμενου δαπέδου, όπως θα προκύπτει από την απευθείας επαφή του με το υγρό άζωτο. Σε κάθε περίπτωση, καλό είναι το θερμοστοιχείο να είναι αρκετά λεπτό ώστε να μην διαταράσσει τη συνέχεια της επιφάνειας συναλλαγής (Βλ. και Εικόνα 5.14)

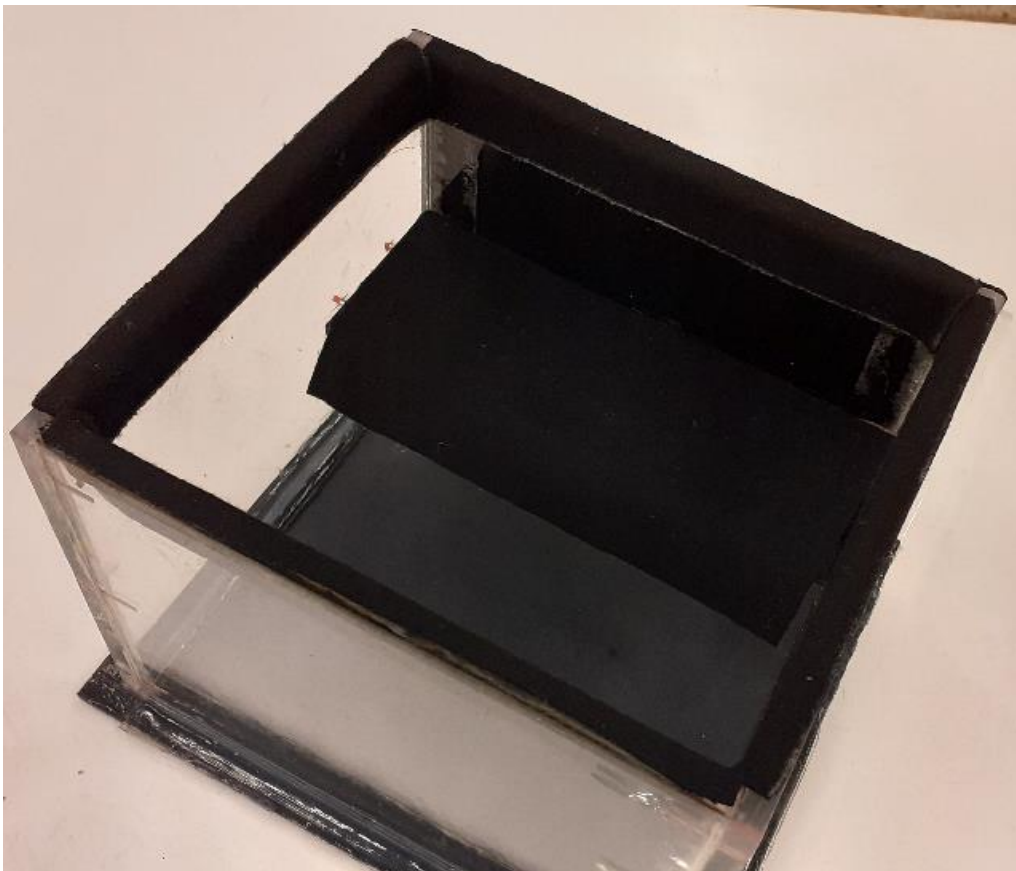


Εικόνα 5.14: Η κεφαλή του θερμοστοιχείου διακρίνεται μεταξύ στρώματος 2 και στρώματος 3 του υφάσματος που καλύπτει το ψυχόμενο δάπεδο.

Υλοποίηση Π5 Σταδιακή τροφοδοσία του θαλάμου με αιθανόλη.

Στα εσωτερικά τοιχώματα του θαλάμου στο άνω μέρος και κοντά στην οροφή επικολλήθηκαν υφασμάτινες λωρίδες από τσόχα πλάτους 2 περίπου cm καλώς διαβρεγμένες με αιθανόλη. Το ίδιο έγινε και στην άνω επιφάνεια του μαύρου σκιάστρου, στην οποία επικολλήθηκε μία

λωρίδα από τσόχα καθ' όλο το μήκος του. Η λωρίδα αυτή ήταν πλάτους 7 περίπου cm. Για την επικόλληση χρησιμοποιήθηκε ταινία διπλής όψης τύπου VHB Tape 4910F της 3M. Η επικόλληση υφασμάτινων λωρίδων στο άνω μέρος του θαλάμου και κοντά στην οροφή βοήθησε και στην καλύτερη στεγάνωση της αποσπώμενης οροφής με τον θάλαμο και επομένως στην καλύτερη απομόνωση του μίγματος ατμών - αερίου από το γειτονικό ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Η επέμβαση διακρίνεται στην Εικόνα 5.15. Η τελική δοκιμή (βλ. λίγο πιο κάτω) έδειξε ότι, πράγματι, η διαφορά θερμοκρασίας της οροφής σε σχέση με το πάτωμα οδηγεί τους ατμούς της αιθανόλης να διαχυθούν κατά τον επιθυμητό τρόπο στον αέρα του θαλάμου και να σχηματίσουν την ευαίσθητη περιοχή.



Εικόνα 5.15: Διάφορες υφασμάτινες λωρίδες μικρού πλάτους επικολλημένες στο άνω μέρος του θαλάμου και εμποτισμένες με αιθανόλη για να διευκολύνεται η ομαλή διάχυση των ατμών αιθανόλης στον αέρα του θαλάμου.

Υλοποίηση Π6 Βελτίωση της παροχής αζώτου στην ψυχόμενη επιφάνεια.

Υλοποιήθηκε όπως προτάθηκε.

Δοκιμή

Η διάταξη του πειράματος μετά τις βελτιώσεις φαίνεται σε αναπαράσταση στις Εικόνα 5.16 και 5.17.



Εικόνα 5.16: Η διάταξη της τελικής σε αναπαράσταση με φωτισμό δωματίου.
Άνω: πλάγια όψη. Κάτω: άλλη πλάγια όψη.

Στην Εικόνα 5.16 άνω, διακρίνεται ξεκινώντας από αριστερά: Το τροφοδοτικό για τη μετάγγιση του υγρού αζώτου, δοχείο μεταφοράς υγρού αζώτου 60 L συνδεδεμένο με τη διάταξη του ψυχόμενου δαπέδου μέσω εργαλείο μεταγγίσεως και σωλήνα latex, ο θάλαμος πάνω στο ψυχόμενο δάπεδο, το βολτόμετρο για την ανάγνωση του θερμοστοιχείου και ο προβολέας διαφανειών ως πηγή φωτός. Το ψυχόμενο δάπεδο βρίσκεται τοποθετημένο πάνω σε βάση από διογκωμένη πολυστερίνη, η οποία λειτουργεί ως μόνωση, ώστε να μην παγώνουν τα πάντα από τη γειτνίαση με το υγρό άζωτο της διάταξης του ψυχόμενου δαπέδου. Επιπλέον η βάση αυτή βοηθάει ώστε να δίνεται εύκολα η κατάλληλη κλίση στο ψυχόμενο δάπεδο, η οποία να διευκολύνει τον καλό πλημμυρισμό του με υγρό άζωτο.



Εικόνα 5.17: Η διάταξη της τελικής σε αναπαράσταση με φωτισμό πειράματος.
Άνω: πλάγια όψη. Κάτω: άλλη πλάγια όψη.

Φωτογραφικές αποτυπώσεις ίχνων

Στις επόμενες εικόνες διακρίνονται χαρακτηριστικές φωτογραφίες από τα ίχνη που επιτεύχθηκαν. Τα ίχνη που παρατηρήθηκαν οπτικά ήταν πολύ περισσότερα και οι φωτογραφίες δεν τα αποδίδουν, είτε διότι δεν λήφθηκαν την κατάλληλη στιγμή είτε διότι ο φωτισμός, η ένταση του οποίου πρέπει να βελτιστοποιηθεί, δεν ήταν κατάλληλος για την σωστή αντίθεση. Σημειώνεται ότι τα ίχνη παρατηρήθηκαν όταν το θερμοστοιχείο έδειχνε θερμοκρασία στην περιοχή από -70 έως -90 °C. Περί τους -90 °C η δοκιμή διακόπηκε, οπότε δεν βρέθηκε αν κάτω από τους -90 °C τα ίχνη θα προέκυπταν καλύτερα ή περισσότερα.



Εικόνα 5.18: Ίχνη ηλεκτρονίων (αρνητική εικόνα)



Εικόνα 5.19: Ίχνος -α σωματιδίου (κέντρο). Ίχνος -δ ακτινοβολίας ή ηλεκτρονίου (δεξιά)

5.5 Επίλογος

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφηκαν η δεύτερη φάση πειραματικών δοκιμών προκειμένου να προκύψει ένας απλός και εύχρηστος καθοδικός θάλαμος νεφώσεως τύπου διάχυσης, ο οποίος να παράγει ίχνη συμπυκνώσεως οφειλόμενα σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Οι δοκιμές της φάσης αυτής πραγματοποιήθηκαν με θάλαμο που κατασκευάστηκε από διαφανές Plexiglass με βάση την τεχνολογία της CloudChambersDotCom. Ο θάλαμος όπως κατασκευάστηκε έχει

τοιχώματα αρκετού πάχους ώστε να περιορίζεται η συναγωγή θερμότητας με το περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα, περιορίστηκαν και τα προβλήματα ορατότητας που δημιουργούσε στις δοκιμές της πρώτης φάσης, η θολότητα λόγω της συμπύκνωσης της ατμοσφαιρικής υγρασίας στο εξωτερικό των τοιχωμάτων του θαλάμου. Η ψυχόμενη επιφάνεια κρατήθηκε σε χαμηλή θερμοκρασία με υγρό άζωτο. Η διάταξη ψύξης της ψυχόμενης επιφάνειας προέκυψε από τα συμπεράσματα που βγήκαν από την πρώτη φάση δοκιμών (βλ. Κεφάλαιο 4). Σημειώνεται ότι η συνολική κατασκευή της διάταξης ψύξης έγινε μεταλλική (ανοξείδωτο δοχείο, ψυχόμενη επιφάνεια από αλουμίνιο) ώστε να αντέχει στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες που επιβάλλει η χρήση του υγρού αζώτου. Είναι εξάλλου γνωστό και από προηγούμενη εμπειρία στο ΕΠΤ-ΕΜΠ ότι δοχεία από πλαστικό (ακρυλικό, PVC ή άλλο) θραύονται πολύ εύκολα από τις παρατηρούμενες συστολές σε επαφή με το υγρό άζωτο. Κατάλληλη αλκοόλη για τη δημιουργία των αναγκαίων ατμών για τα πειράματα θεωρήθηκε η αιθανόλη έναντι της εναλλακτικής ισοπροπυλικής αλκοόλης λόγω του ότι η πρώτη έχει χαμηλότερο σημείο πήξεως από τη δεύτερη και για αυτό το λόγο πιθανότατα "συνεργάζεται" καλύτερα με το υγρό άζωτο που έχει πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία από τον ξηρό πάγο. Το θέμα πάντως της επιλογής της καταλληλότερης αλκοόλης δεν εξαντλήθηκε πειραματικά.

Στις δοκιμές της δεύτερης φάσης παρατηρήθηκαν ίχνη τόσο από ηλεκτρόνια όσο και από -α σωματίδια. Τα κύρια εμπόδια για τα ίχνη ήταν:

(α) Αραιό νέφος στην ευαίσθητη περιοχή, που μπορεί να αντιμετωπισθεί με προσεκτικότερο έλεγχο των διαρροών με στεγάνωση του θαλάμου στη διεπαφή με το ψυχόμενο δάπεδο. Σημειώνεται ότι γενικά η σημασία του ελέγχου των διαρροών δεν επισημαίνεται όπως θα έπρεπε, ούτε στις διάφορες δημοσιεύσεις σχετικά με θαλάμους νεφώσεως ούτε και στις διάφορες διαδικτυακές αναφορές. Επιπλέον η πυκνότητα του νέφους εξαρτάται πολύ από τη χρονική στιγμή. Η καλύτερη πυκνότητα επιτυγχάνεται γενικά μετά από την πάροδο μικρού χρόνου, τυπικά στην περιοχή των 10 λεπτών της ώρας, από τη στιγμή της ομοιόμορφης ψύξης της ψυχόμενης επιφάνειας και της έναρξης της διάχυσης των ατμών της αιθανόλης στον αέρα. Κάθε είσοδος σώματος υψηλότερης θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θαλάμου, όπως π.χ. αιθανόλης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή του μεταλλικού ηλεκτροδίου με θόριο, καταστρέφει το νέφος και δημιουργεί φαινόμενα ανομοιομορφίας τα οποία πρέπει να υποχωρήσουν προκειμένου να συνεχίζονται οι παρατηρήσεις σε νέφος κατάλληλης πυκνότητας.

(β) Ευαίσθητη περιοχή σε μικρή απόσταση από την ψυχόμενη επιφάνεια που μπορεί να αντιμετωπισθεί με ελάττωση της βαθμίδας μείωσης της θερμοκρασίας μεταξύ της θερμής οροφής και του ψυχόμενου δαπέδου,

και

(γ) Ανομοιομορφία στο νέφος οφειλόμενη σε ανομοιομορφία στο πεδίο θερμοκρασίας πάνω στο ψυχόμενο δάπεδο ή στο πάτωμα του θαλάμου που μπορεί να αντιμετωπισθεί με καλή πλήρωση της διάταξης του ψυχόμενου δαπέδου με υγρό άζωτο και εξασφάλιση της καλής και ομοιόμορφης μετάδοσης θερμότητας προς τον θάλαμο. Οι οπτικές παρατηρήσεις και οι φωτογραφικές αποτυπώσεις διευκολύνθηκαν από την πηγή φωτός και την αντίθεση που δημιουργείται από το μαύρο δάπεδο στα πειράματα. Ασφαλώς παρατηρήσεις με λιγότερη αντίθεση μπορούν να γίνονται και με δάπεδα από άλλο χρώμα. Αν μπορεί να γίνει, είναι καλό το χρώμα του δαπέδου να μην προκύπτει από χρωματισμό ή κάλυψη με μαύρη πλαστική ταινία ή μαύρο αυτοκόλλητο, διότι αυτά αλλοιώνονται με το πείραμα λόγω της δράσεως της αλκοόλης σε χαμηλή θερμοκρασία.

Με βάση τις δοκιμές και τα συμπεράσματα που προέκυψαν κρίνεται ότι ικανοποιήθηκε ο σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας, δηλαδή η κατασκευή ενός απλού, χαμηλού κόστους, εύχρηστου και λειτουργικού θαλάμου νεφώσεως για παρατηρήσεις που να εξυπηρετούν τους εκπαιδευτικούς σκοπούς των μαθημάτων των σχετικών με ραδιενεργές ακτινοβολίες, την μέτρηση και την ανίχνευσή τους και ιδιαιτέρως το μάθημα "Πυρηνικά Μετρητικά Συστήματα". Τη μεγαλύτερη δυσκολία στη χρήση του θαλάμου βάζει ασφαλώς η ψύξη με υγρό άζωτο. Το συνολικό κόστος υλικών της τελικής πειραματικής διάταξης, χωρίς σε αυτό να συμπεριλαμβάνεται το κόστος του αζώτου ή το κόστος εργασίας για τη σύνθεση των υλικών στην τελική τους μορφή, ήταν στην περιοχή των 100 ΕΥΡΩ.

Σε επόμενη φάση δοκιμών, είτε στα πλαίσια μαθημάτων, είτε στα πλαίσια φοιτητικών εργασιών μπορούν οι δοκιμές να βελτιστοποιηθούν σε δύο κυρίως σημεία:

(1) Να διερευνηθεί το πεδίο θερμοκρασιών του πατώματος του θαλάμου, όπως αποτυπώνεται από το θερμοστοιχείο τοποθετημένο μεταξύ του 2^{ου} και του 3^{ου} υφασμάτινου στρώματος, για το οποίο τα ίχνη που προκύπτουν γίνονται καλύτερα και περισσότερα. Σύμφωνα με την τελική δοκιμή, μπορεί κανείς να πει ότι ίχνη παρατηρούνται στην περιοχή θερμοκρασιών από -70 έως -90 °C. Πιθανόν, η περιοχή αυτή να είναι ευρύτερη και σε κάποια υποπεριοχή της τα ίχνη να είναι καλύτερα και περισσότερα.

(2) Να διερευνηθεί η κατάλληλη για το πείραμα ένταση φωτός. Διακρίνεται και από τις φωτογραφίες στις Εικόνες 5.16 και 5.17, ότι η ένταση του φωτός είναι μεγάλη, πράγμα που δεν βοηθάει στην παρατήρηση και τη φωτογράφιση με καλή αντίθεση. Η ένταση του φωτός μπορεί να ρυθμισθεί με κάποιο διαφώτιστο εμπόδιο, αλλά και με αλλαγή της πηγής με πιθανότερη άλλη πηγή ένα led panel, ή έναν επίπεδο φακό led.

Επιπλέον οι δοκιμές μπορούν να επεκταθούν και να συμπεριλάβουν την αλληλεπίδραση του θαλάμου με ηλεκτρικά πεδία διαφόρων μορφών και εντάσεων, καθώς και με μαγνητικά πεδία. Τα ηλεκτρικά πεδία αναμένεται να επηρεάσουν το πλήθος των ιχνών και την τροχιά τους με τρόπο που ήδη έχει εξηγηθεί, ενώ τα μαγνητικά πεδία αναμένεται να επηρεάσουν μόνο την τροχιά τους. Άλλες δοκιμές μπορούν ακόμα να συμπεριλάβουν πειράματα με ραδόνιο-222, το οποίο διασπώμενο αναμένεται να γεμίσει το θάλαμο με ίχνη από -α σωματίδια, οφειλόμενα τόσο στο ίδιο το ραδόνιο όσο και στα θυγατρικά του Po-218 και Po-214, αλλά και με ίχνη από -β σωματίδια από τις διασπάσεις των θυγατρικών του Pb-214 και Bi-214. Οι δοκιμές με το ηλεκτρικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο και το ραδόνιο μπορούν να παρατηρηθούν οπτικά χωρίς κίνδυνο του παρατηρητή. Άλλη δοκιμή που μπορεί να γίνει με φωτογραφική ή βιντεοσκοπική παρατήρηση και στην οποία μπορεί να λείπει ο φυσικός παρατηρητής, είναι η τοποθέτηση ενός φύλλου μολύβδου εντός του θαλάμου και η ακτινοβόλησή του με πεδίο ακτίνων -x προερχόμενο από πηγή εκτός του θαλάμου. Όπως είναι φυσικό θα προκληθεί φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Τα σχετικά ηλεκτρόνια αναμένεται να γίνουν ορατά σαν να πηγάζουν από την επιφάνεια του φύλλου μολύβδου. Τέλος, αν το θοριούχο ηλεκτρόδιο εισαχθεί κατακόρυφα στο θάλαμο, τότε η περιοχή υψών, στην οποία παρατηρούνται ίχνη μπορεί να οριοθετηθεί με αποτέλεσμα να παράγεται εμμέσως και μία εκτίμηση των ορίων ύψους της ευαίσθητης περιοχής του θαλάμου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Λεωνίδου Δ.Ι., "Μέθοδοι και Όργανα Ανιχνεύσεως Πυρηνικών Ακτινοβολιών", ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα 1990
2. Μουστάκας Κ., Σταθόπουλος Δ., "Θάλαμος Νεφών", Ίδρυμα Ευγενίδου, 2019 (διαθέσιμο στο διαδίκτυο)
3. Χρυσικόπουλος Σ., "Μελέτη και Τεκμηρίωση Εγκαταστάσεων Βιομηχανικής Ραδιογραφίας του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας", Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ Εφαρμοσμένη Μηχανική, Αθήνα 2009
4. Agu B.N.C., "Diffusion Cloud Chamber for Demonstration Purposes" IOP Publishing, Physics Education, 8, 42-44, 1973
5. Bastos R.O., Boff C.A., Melquiades F.L., "Nuclear physics experiments with low cost instrumentation", IOP Publishing, Physics Education, 51, 1-6, 2016
6. CloudChambersDotCom (Supersaturated Environments, A Division of Reflection Imaging Inc.), "Diffusion Cloud Chambers Guide to Operation and Maintenance", Madison, 2001
7. CloudChambersDotCom (Supersaturated Environments, A Division of Reflection Imaging Inc.), Brochure: "Ideal instruments for visual demonstration of the cosmic rays and natural radioactivity all around us", Madison, 2008 (διαθέσιμο στο διαδίκτυο)
8. Clark K., "The Cloud Chamber Experiment", University of Toronto, 2019 (διαθέσιμο στο διαδίκτυο)
9. Green F., "Making a fish tank cloud chamber", IOP Publishing, Physics Education, 47, 338-341, 2012
10. Kamata M., Kubota M., "Simple cloud chambers using gel ice packs", IOP Publishing, Physics Education, 47, 429-433, 2012
11. Langsdorf A. Jr., "A Continuously Sensitive Diffusion Cloud Chamber", Review of Scientific Instruments 10, 91-103, 1939
12. Longair M., "C.T.R. Wilson and the cloud chamber", Astroparticle Physics, 53, 55-60, 2014

13. Lyapidevskii V.K., "Diffusion Cloud Chambers", Soviet Physics Progress, 66, 124-138, 1958
14. Nielsen C.E., Needels T.S., Weddle O.H., "Diffusion Cloud Chambers", Review of Scientific Instruments 22, 673-677, 1951
15. Wilson C.T.R., "Condensation of water vapour in the presence of dust-free air and other gases", Philosophical Transactions of the Royal Society A189, 265–306, 1897
16. Woithe J., "Cloud Chamber S' Cool LAB - Do-It-Yourself manual", CERN, 2016
17. Yoshinaga K., Kubota M., Kamata M., "Simple cloud chambers using a freezing mixture of ice and cooking salt", IOP Publishing, Physics Education, 50, 23-27, 2015
18. Zeze S., Itoh A., Oyama A., Takahashi H., "A sensitive cloud chamber without radioactive sources", IOP Publishing, Physics Education, 47, 574-578, 2012