



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

**Μελέτη και εγκατάσταση συστήματος
απογύμνωσης ιόντων στον 5.5 MV επιταχυντή
Tandem Van de Graaff του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε.
“Δημόκριτος”**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Λαουτάρη Άγγελου

Ερευνητικός Επιβλέπων:	Ακαδημαϊκός Επιβλέπων:
Θεόδωρος Τζούρος Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης	Μιχαήλ Κόκκορης Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος, 2016

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	13
1.1	Κίνητρο της εργασίας	13
1.2	Αντικείμενο της διπλωματικής	13
1.3	Δομή εργασίας	14
2	Επιταχυντές Tandem Van de Graaff και απογύμνωση ιόντων	15
2.1	Εισαγωγή	15
2.2	Η γεννήτρια Van de Graaff	15
2.2.1	Η αρχή λειτουργίας της γεννήτριας Van de Graaff	16
2.2.2	Βασικά χαρακτηριστικά και αρχές λειτουργίας επιταχυντών τύπου Tandem Van de Graaff.	17
2.3	Η τεχνική της απογύμνωσης ιόντων	19
2.3.1	Μηχανισμοί ανταλλαγής φορτίου κατά την κρούση ιόντων - ατόμων.	20
3	Η πρωτοβουλία της πειραματικής ομάδας του APAPES	25
3.1	Εισαγωγή	25
3.2	Η φασματοσκοπία ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης	25
3.2.1	Διαδικασίες μεταφοράς ηλεκτρονίων και παραγωγή ηλεκτρονίων Auger	27
3.3	Τα κύρια μέρη της πειραματικής διάταξης του APAPES	30
3.4	Το κελί του αερίου στόχου	30
3.4.1	Η διαφορική άντληση του κενού	31
3.4.2	Η παροχή του κελιού με το αέριο - στόχο	33
3.4.3	Η χρησιμότητα μιας βάσης ευθυγράμμισης στόχου μεγάλης ακρίβειας	34
3.4.4	Η βάση ευθυγράμμισης του στόχου	35
3.5	Το φασματόμετρο ηλεκτρονίων	36
3.6	Ο ανιχνευτής	37
4	Απογύμνωση ιόντων	39
4.1	Εισαγωγή	39
4.2	Θεωρητικές μελέτες	40
4.3	Μαθηματική περιγραφή των διαδικασιών ανταλλαγής φορτίου	40
4.3.1	Διαφορικές εξισώσεις υπολογισμού καταστάσεων φορτίου	40

4.3.2	Ισορροπία καταστάσεων φορτίου	41
4.4	Ενεργές διατομές παραγωγής καταστάσεων φορτίου	43
4.5	Ημι-εμπειρικές μέθοδοι προσδιορισμού κλασμάτων καταστάσεων φορτίου κατά την απογύμνωση ιόντων	44
4.6	Η ανάγκη για έναν μετα-απογυμνωτή ηλεκτρονίων στην φασματοσκοπία ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης	46
4.7	Ιδιότητες των απογυμνωτών ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης υμενίων άνθρακα και αερίου	47
4.8	Θεωρητικοί υπολογισμοί πιθανοτήτων καταστάσεων φορτίου	47
5	Απογυμνωτές ιόντων δέσμης και πειραματικά αποτελέσματα	51
5.1	Εισαγωγή	51
5.2	Ο απογυμνωτής ηλεκτρονίων υμενίων άνθρακα ιόντων δέσμης.	51
5.3	Ο απογυμνωτής ηλεκτρονίων αερίου ιόντων δέσμης.	52
5.4	Μελέτη των τεχνικών δυσκολιών εγκατάστασης και ομαλής λειτουργίας ενός αερίου απογυμνωτή ηλεκτρονίων.	54
5.5	Πειραματικά αποτελέσματα φασματοσκοπίας ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης με χρήση μετα-απογυμνωτών ιόντων δέσμης.	56
5.5.1	Φάσματα ηλεκτρονίων Auger $C^{4+} + He$	59
5.5.2	Φάσματα ηλεκτρονίων Auger $C^{4+} + Ne$	59
5.6	Συμπεράσματα- Προοπτικές	60
	Παράρτημα	66
	Α΄ Πίνακες κλασμάτων καταστάσεων φορτίου	67
A.1	Πίνακες ποσοστών ηλιοειδών καταστάσεων	67
	Β΄ Μηχανολογικά σχέδια	73
B.1	Μηχανολογικά σχέδια της βάσης ευθυγράμμισης του κελιού στόχου	73
B.2	Μηχανολογικά σχέδια του αερίου απογυμνωτή ιόντων	86
	Γ΄ Διεθνείς δημοσιεύσεις	97
Γ.1	Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά	97
Γ.2	Πρακτικά διεθνών συνεδρίων	97

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Ο Robert J. Van de Graaff	16
2.2	Van de Graaff generator	17
2.3	Ο επιταχυντής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε Δημόκριτος	18
2.4	Το δωμάτιο του επιταχυντή	18
2.5	Το θερματικό	19
2.6	Οι δύο τεχνικές απογύμνωσης ιόντων δέσμης	20
2.7	Μηχανισμοί ανταλλαγής φορτίου σύμφωνα με τον H.D. Betz	21
2.8	Ο μηχανισμός δέσμευσης ηλεκτρονίου με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας	22
2.9	Μηχανισμοί δημιουργίας και συμπλήρωσης οπών	22
2.10	Μηχανισμοί διέγερσης και αποδιέγερσης ηλεκτρονίων	23
3.1	Τυπικά φάσματα ανθρακα φασματοσκοπίας ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης	26
3.2	Το σύστημα στόχου, αναλυτή, ανιχνευτή	27
3.3	Τα στάδια παραγωγής ηλεκτρονίων Auger ιόντων δέσμης	28
3.4	Οι διαδικασίες μεταφοράς και διέγερσης, Transfer and Excitation processes	29
3.5	Η δημιουργία της πειραματικής γραμμής L45 του APAPES	30
3.6	Η πειραματική γραμμή L45 του APAPES	31
3.7	Το κελί αερίου στόχου	32
3.8	Σύγκριση πιέσεων εντός του πειραματικού θαλάμου με τις νέες και τις παλιές εισόδους - εξόδους του κελιού - στόχου.	32
3.9	Η διαφορική άντληση του αερίου	33
3.10	Το σύστημα σταθεροποίησης πίεσης αερίου στόχου	34
3.11	Το σύστημα παροχής των αερίων στόχου	34
3.12	Γεωμετρική μελέτη των συνθηκών ευθυγράμμισης του στόχου	35
3.13	Το σύστημα βάσης ευθυγράμμισης-στόχου	36
3.14	Η νέα βάση ευθυγράμμισης	36
3.15	Το φασματομέτρο	37
3.16	Ο πολυκαναλικός ανιχνευτής	38
4.1	Διάγραμμα μέσης τιμής φορτίου ιόντων ιωδίου συναρτήσει της ενέργειας απογύμνωσης	43
4.2	Διάγραμμα μεταβολής καταστάσεων φορτίου ιόντων συναρτήσει της πυκνότητας του στόχου	44

4.3	Διάγραμμα πιθανοτήτων παραγωγής καταστάσεων φορτίου σύμφωνα με τον ημι-εμπειρικό τύπου του R.O. Sayer	45
4.4	Διάγραμμα πιθανοτήτων καταστάσεων φορτίου ως συνάρτηση της τιμής του φορτίου της κάθε κατάστασης	48
4.5	Δημιουργία των καταστάσεων B^{3+}	49
4.6	Δημιουργία των καταστάσεων C^{4+}	49
4.7	Δημιουργία των καταστάσεων O^{6+}	50
4.8	Δημιουργία των καταστάσεων F^{7+}	50
5.1	Ο απογυμνωτής ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης υμενίων άνθρακα	52
5.2	Ο απογυμνωτής ηλεκτρονίων αερίου ιόντων δέσμης	53
5.3	Το σύστημα διατήρησης του κενού (1)	55
5.4	Το σύστημα διατήρησης του κενού (2)	55
5.5	Το σύστημα περιορισμού του αερίου απογυμνωτικού μέσου	56
5.6	Μηχανολογικό σχέδιο του αερίου απογυμνωτή ηλεκτρονίων	56
5.7	Διάγραμμα πίεσης στην γραμμή του επιταχυντή συναρτήσει της πίεσης του αερίου στον μετα-απογυμνωτή	57
5.8	Το σύστημα των απογυμνωτών ηλεκτρονίων	57
5.9	Εργασίες εγκατάστασης	58
5.10	Το σημείο των απογυμνωτών ηλεκτρονίων	58
5.11	Φάσμα ηλεκτρονίων 12 MeV $C^{4+} + He$	59
5.12	Φάσμα ηλεκτρονίων 12 MeV $C^{4+} + Ne$	60
5.13	Φάσμα ηλεκτρονίων 12 MeV $C^{4+} + Ne$	61
5.14	Φάσμα ηλεκτρονίων 12 MeV $C^{4+} + Ne$	62
A.1	Οι τύποι του R. O. Sayer που χρησιμοποιούνται στο TARDIS.	67

Κατάλογος Πινάκων

3.1 Χαρακτηριστικά του κελιού αερίου-στόχου	31
4.1 Πειραματικές τιμές συντελεστών που χρησιμοποιούνται στις εξ. 4.17- 4.20 για αέρια και στερεό μέσο (T).	46
A.1 Πιθανότητες δημιουργίας της κατάστασης φορτίου B^{3+}	68
A.2 Πιθανότητες δημιουργίας της κατάστασης φορτίου C^{4+}	69
A.3 Πιθανότητες δημιουργίας της κατάστασης φορτίου N^{5+}	70
A.4 Πιθανότητες δημιουργίας της κατάστασης φορτίου O^{6+}	71
A.5 Πιθανότητες δημιουργίας της κατάστασης φορτίου F^{7+}	72

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία δεν θα είχε πραγματοποιηθεί αν δεν είχα την βοήθεια και την υποστήριξη συγκεκριμένων ατόμων τα οποία νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω. Κατ' αρχάς θέλω να ευχαριστήσω τον επιστημονικό μου επιβλέποντα κ. Θεόδωρο Τζούρο (Καθηγητή, Τμήμα Φυσικής ΠΚ) για την καθοδήγηση και τις γνώσεις που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, όπως επίσης και για την βοήθεια που μου παρείχε για την συμμετοχή μου σε επιστημονικά συνέδρια για την περαιτέρω εξέλιξή μου στο πεδίο της ατομικής φυσικής. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον ακαδημαϊκό επιβλέποντα μου κ. Μιχαήλ Κόκκορη (Αναπληρωτή καθηγητή, Σ.Ε.Μ.Φ.Ε ΕΜΠ) και τον κ. Θεόδωρο Μερτζιμέκη (Επίκουρο καθηγητή, Τμήμα Φυσικής ΕΚΠΑ) για τις γνώσεις που μου παρείχαν κατά το διάστημα των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της πειραματικής ομάδας του APAPES, κ. Εμμανουήλ Μπενή (Επίκουρο καθηγητή, Τμήμα Φυσικής ΠΙ), κ. Αναστάσιο Δημητρίου, κ. Ιωάννη Μαδέση και κ. Χρήστο Νούνη για τις γνώσεις που μου παρείχαν και την καλή συνεργασία, την κα. Μυρτώ Ασημακοπούλου όπως και την πειραματική ομάδα και το προσωπικό του εργαστηρίου της TANDEM, κ. Αναστάσιο Λαγογιάννη, κ. Μιλτιάδη Ανδριάνη, κα. Βαρβάρα Φωτεινού, κ. Μιχάλη Αξιώτη, κ. Γεώργιο Προβατά, κ. Μάνο Τσομπανάκη και κ. Βασίλη Ανδρεόπουλο για την βοήθεια τους.

Ειδικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διευθυντή του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής και εργαστηρίου της TANDEM, κ. Σωτήριο Χαρισόπουλο, για την φιλοξενία μιας πειραματικής ομάδας εξωτερικών χρηστών όπως αυτή του APAPES στο εργαστήριο της TANDEM, και για την δυνατότητα που μου δόθηκε να συμβάλλω στην διάταξη του επιταχυντή στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την στήριξη τους καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

A. Λαουτάρης

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια μεταπτυχιακών σπουδών στο Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης “Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές” της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π. Η εργασία σχεδόν στο σύνολό της πραγματοποιήθηκε στον επιταχυντή Tandem Van de Graaff του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε “Δημόκριτος” κατά την περίοδο Ιούλιος 2014 - Φεβρουάριος 2016 υπό την επιστημονική επίβλεψη του καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης κ. Θεόδωρο Τζούρο, και την ακαδημαϊκή επίβλεψη του αναπληρωτή καθηγητή του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π κ. Μιχαήλ Κόκκορη.

Στην παρούσα εργασία αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της απογύμνωσης ιόντων και οι πρακτικές εφαρμογές των απογυμνωτών ιόντων δέσμης. Στα πλαίσια της εργασίας σχεδιάστηκε κατασκευάστηκε και εγκαταστάθηκε ένα σύστημα αποτελούμενο από δυο απογυμνωτές ιόντων, έναν λεπτών υμενίων και έναν αερίου στην διάταξη του επιταχυντή Tandem Van de Graaff του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε “Δημόκριτος”. Το σύστημα αυτό είναι μια προσθήκη μετα-απογυμνωτών δέσμης μεταξύ του μαγνήτη ανάλυσης και του μαγνήτη επιλογής πειραματικής γραμμής του επιταχυντή για την παραγωγή υψηλά φορτισμένων ιόντων. Αρχικά θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος APAPES για την παραγωγή ηλιοειδών ατόμων για έρευνα στον τομέα της ατομικής φυσικής, παράλληλα όμως θα μπορεί να χρησιμοποιείται και από άλλες πειραματικές ομάδες στο ίδιο εργαστήριο. Επίσης παρατίθενται πειραματικά αποτελέσματα με την συνεισφορά των δύο αυτών νέων συστημάτων.

Το ερευνητικό πρόγραμμα APAPES¹ είναι μια πρωτοβουλία εξωτερικών χρηστών από διάφορα πανεπιστήμια της Ελλάδας, που έστησαν μια αποκλειστική πειραματική γραμμή στο εργαστήριο της TANDEM σε συνεργασία με τους ερευνητές του ΙΠΣΦ για βασική έρευνα στον τομέα της ατομικής φυσικής. Το APAPES υλοποιήθηκε υπό την εποπτεία και την καθοδήγηση του καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης κ. Θεόδωρο Τζούρο και χρηματοδοτήθηκε στην αρχική του φάση από το πρόγραμμα ΘΑΛΗΣ².

¹Atomic Physics with Accelerators: Projectile Electron Spectroscopy - APAPES: <http://apapes.physics.uoc.gr/>

²ΓΓΕΤ - ΕΣΠΑ 2007-2014 (<http://www.gsrt.gr/>)

Title

**Study and implementation of a system of ion post-strippers
for use at the 5.5 MV Tandem Van de Graaff accelerator
of the National Center for Science and Research “Demokritos”**

Abstract

The basic aim of this work is to describe the design, construction and implementation of a system of ion post-strippers for use at the existing Tandem Van de Graaff accelerator of the National Center for Science and Research (N.C.S.R.) “Demokritos”. The post-stripper system, consisting of a gas and a foil stripper, was installed in the beam line between the analyzing and switching magnets of the Tandem. This addition is essential for the production of highly charged ions in general and in particular for the helium-like ions used for projectile electron spectroscopy within the APAPES³ research initiative. The APAPES initiative is the first research project in Greece to use accelerators for atomic physics investigations. Its goal is to perform measurements of the excitation of the projectile ion using high resolution Auger electron spectrometry. This thesis is a contribution to the whole project. In this thesis both a theoretical and an experimental approach to ion stripping is presented, along with a comparison between terminal- and post- stripping with both foils and gas. The whole project was completed at the N.C.S.R. “Demokritos” in the Institute of Nuclear and Particle Physics in Athens, Greece, under the supervision of Professor Theo J.M. Zouros of the University of Crete.

³Atomic Physics with Accelerators: Projectile Electron Spectroscopy - APAPES:
<http://apapes.physics.uoc.gr/>

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο της εργασίας

Έρευνες πάνω στη διαφοροποίηση του φορτίου ταχέως κινούμενων ιόντων κατά τη διέλευση τους μέσα από κάποιο μέσο - στόχο οδήγησαν σταδιακά στην δημιουργία συστημάτων γνωστών ως απογυμνωτές ιόντων για πρακτικές εφαρμογές. Οι απογυμνωτές ιόντων χρησιμοποιούνται στους ηλεκτροστατικούς επιταχυντές τύπου Tandem Van de Graaff και όχι μόνο, για την μετατροπή αρνητικών ιόντων σε θετικά παράγοντας μια κατανομή καταστάσεων φορτίου [1].

Ο επιταχυντής Tandem Van de Graaff του εργαστηρίου της TANDEM χρησιμοποιεί ένα τέτοιου είδους σύστημα απογυμνωτή στο εσωτερικό του (στο terminal) για την παραγωγή διαφορετικών καταστάσεων φορτίου ιόντων. Υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι υψηλά φορτισμένες καταστάσεις ιόντων είναι αδύνατον να παραχθούν με απογύμνωση στις ενέργειες που μπορεί να έχει η δέσμη πριν την πλήρη επιτάχυνσή της [2, 3]. Για τη δημιουργία τέτοιων καταστάσεων φορτίου έπρεπε να κατασκευασθεί και να εγκατασταθεί ένα δεύτερο σύστημα απογύμνωσης ιόντων, μετά την τελική επιτάχυνση του ιόντος από τον επιταχυντή, και ειδικότερα μεταξύ των μαγνητών ανάλυσης και επιλογής - εξού και ο όρος μέτα-απογυμνωτής (post-stripper) για να ξεχωρίσει από τους απογυμνωτές εντός του επιταχυντή.

Αυτή η ανάγκη προέκυψε στα πλαίσια της πειραματικής πρωτοβουλίας APAPES η οποία πραγματοποιεί έρευνα στον τομέα της φασματοσκοπίας ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης και συγκεκριμένα ψηλά φορτισμένα ιόντα, όπως π.χ. ιόντα με δύο μόνο ηλεκτρόνια δηλαδή ηλιοειδή ιόντα B^{3+} , C^{4+} , N^{5+} , O^{6+} , F^{7+} . Με την προσθήκη αυτού του συστήματος δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας υψηλά φορτισμένων ιόντων για την μελέτη των φαινομένων που τροφοδοτούν την εκπομπή ηλεκτρονίων Auger [4].

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και η εγκατάσταση ενός συστήματος αποτελούμενου από δυο είδη μετα-απογυμνωτών ιόντων. Έναν απογυμνωτή λεπτών υμενίων και ενός αερίου. Το σύστημα αυτό εγκαταστάθηκε σε σημείο μετέπειτα του υ-

πάρχοντος απογυμνωτή στο τερματικό του επιταχυντή γιαυτό και εφεξής θα αναφέρονται ως μετα-απογυμνωτές (post-strippers). Για την επίτευξη αυτού του στόχου ήταν αναγκαίος ο τρισδιάστατος σχεδιασμός με το λογισμικό Solidworks © [5] ολόκληρου του συστήματος που εγκαταστάθηκε στον επιταχυντικό σωλήνα, αλλά και του υπάρχοντος συστήματος έτσι ώστε να διασφαλιστεί η σωστή εφαρμογή. Στην συνέχεια με βάση αυτά τα σχέδια κατασκευάστηκε ένας αέριος απογυμνωτής στο μηχανουργείο του εργαστηρίου του επιταχυντή. Κατά την κατασκευή και εγκατάσταση του συστήματος επιλύθηκαν ένας αριθμός από τεχνικά προβλήματα. Τέλος όλο το σύστημα εγκαταστάθηκε με επιτυχία και δοκιμάστηκε πειραματικά παράγοντας με δύο στάδια απογύμνωσης ιόντα C^{4+} για την χρήση στις μετρήσεις του προγράμματος APAPES.

1.3 Δομή εργασίας

- Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των επιταχυντών Tandem Van de Graaff και η χρήση απογυμνωτών στην λειτουργία τους.
- Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διάταξη του APAPES που χρησιμοποιείται για φασματοσκοπία ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης σε μηδέν μοίρες (Zero degree Auger Projectile Spectroscopy - ZAPS [6]).
- Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται θεωρητικές μελέτες απογύμνωσης ιόντων και η ανάγκη για ένα σύστημα μετα-απογυμνωτών ιόντων δέσμης.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των μετα-απογυμνωτών ιόντων και η εγκατάσταση τους και παρατίθενται πειραματικά αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 2

Επιταχυντές Tandem Van de Graaff και απογύμνωση ιόντων

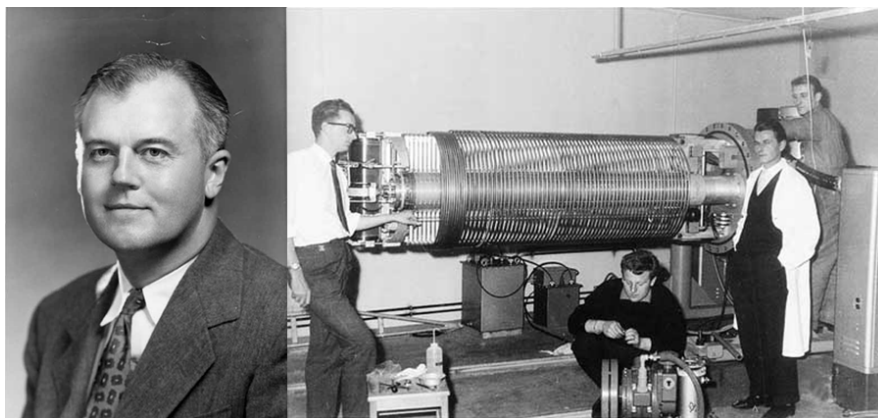
2.1 Εισαγωγή

Με την έλευση του 20ου αιώνα, τα φαινόμενα του ηλεκτρισμού άρχισαν να μοιάζουν λιγότερο μυστήρια και οι πρώτες πηγές τάσεων και ρεύματος έγιναν διαθέσιμες. Οι τομείς της ατομικής και πυρηνικής φυσικής άρχισαν να αναπτύσσονται και μαζί τους αναπτύχθηκε και το ενδιαφέρον για τις ηλεκτροστατικές μηχανές-γεννήτριες. Η έρευνα στον τομέα της φασματοσκοπίας στοιχείων και ιόντων έφεραν στο προσκήνιο την επιτάχυνση σωματιδίων. Σε αρχικές έρευνες ιονισμένα σωματίδια επιταχύνονταν μεταξύ μιας σταθερής διαφοράς δυναμικού και στην συνέχεια αναγνωρίζονταν από τον λόγο φορτίου-μάζας αναλόγως την απόκλιση τους κατά την διέλευση τους μέσα από ένα μαγνητικό πεδίο. Ένας αριθμός επιστημόνων άρχισε να αναπτύσσει ηλεκτροστατικές μηχανές-γεννήτριες με σκοπό να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή επιταχυντών [1]. Ένας από τους πιο διαδεδομένους από αυτούς, είναι ο επιταχυντής τύπου Tandem Van de Graaff και είναι ο τύπος που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο της TANDEM. Ο τύπος αυτός επιταχυντή χρησιμοποιεί την τεχνική της απογύμνωσης ιόντων για την επιτάχυνση σωματιδίων. Στην συνέχεια αναλύεται η λειτουργία του και ο τρόπος με τον οποίο σχετίζεται με την απογύμνωση ιόντων.

2.2 Η γεννήτρια Van de Graaff

Ο Αμερικανός φυσικός, Dr. Robert Jemison Van de Graaff ξεκίνησε να πειραματίζεται με μια γεννήτρια τάσης με χρήση ιμάντα το 1929, και το 1931 παρουσίασε στην αμερικανική επιστημονική κοινότητα το πρώτο μοντέλο της γεννήτριας Van de Graaff. Η γεννήτρια αυτή στα επόμενα χρόνια τροποποιήθηκε και ξεκίνησε να χρησιμοποιείται σε ηλεκτροστατικούς επιταχυντές. Η συσκευή αυτή είχε αρχικά την δυνατότητα να παράγει τάσεις έως 1.5 MV. Στις μέρες μας γεννήτριες Van de Graaff που χρησιμοποιούνται σε επιταχυντές μπορούν να παράγουν τάσεις δεκάδων MV. Ο Van de Graaff επινόησε την γεννήτρια για να παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια που χρειάζονταν για τους πρώι-

μους επιταχυντές σωματιδίων. Αυτοί οι επιταχυντές, γνωστοί και ως επιταχυντές Van de Graaff, χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα σε πειράματα πυρηνικής και ατομικής φυσικής [1].

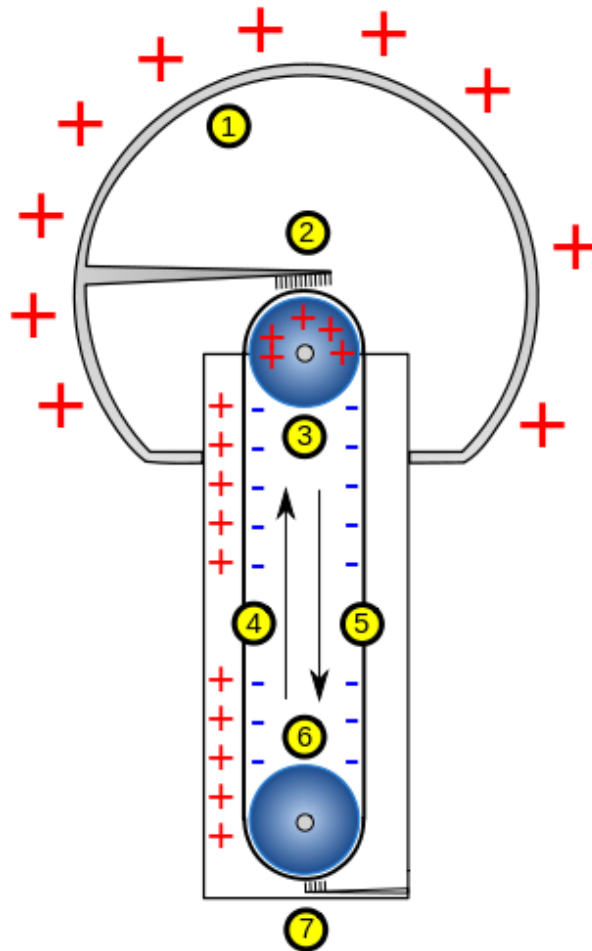


Σχήμα 2.1: Ο Robert J. Van de Graaff (αριστερά), και ο ηλεκτροστατικός επιταχυντής που δημιουργήθηκε βασισμένος στην γεννήτρια Van de Graaff (δεξιά).

2.2.1 Η αρχή λειτουργίας της γεννήτριας Van de Graaff

Το σύστημα της γεννήτριας αποτελείται από μια μεγάλη μεταλλική σφαίρα τοποθετημένη πάνω σε στέρεες στήλες μονωτικού υλικού, συνήθως γυαλιού βλ. σχ. 2.2. Ένας ιμάντας φτιαγμένος από μονωτικό υλικό κινείται εφαιπτόμενος σε δύο κυλίνδρους ③ και ⑥. Ο κύλινδρος ③ βρίσκεται στο κέντρο της μεταλλικής σφαίρας ενώ ο ⑥ είναι κατακόρυφος με τον ③ και βρίσκεται στο κάτω μέρος του επιταχυντή. Οι δύο κύλινδροι περιστρέφονται με την βοήθεια ενός μοτέρ και κινούν συνεχώς τον ιμάντα. Στα σημεία ② και ⑦ υπάρχουν δύο συστήματα με μεταλλικές ακίδες οι οποίες ονομάζονται “collecting combs” [1, 7].

Το θετικό τερματικό μιας πηγής υψηλής τάσης μέχρι 50 kV είναι συνδεδεμένο με τον κόμβο ⑦. Εκεί δημιουργούνται φορτία τα οποία συγκεντρώνονται στις άκρες των μεταλλικών ακίδων η οποία βρίσκεται σε επαφή με τον ιμάντα. Το ηλεκτρικό πεδίο εκεί αυξάνει και ιονίζει τον αέρα κοντά. Τα θετικά φορτία απωθούνται και εναποτίθενται στο ιμάντα λόγω του φαινομένου “corona discharge”. Τα φορτία μεταφέρονται με τον ιμάντα προς τα πάνω καθώς κινείται. Όταν το θετικά φορτισμένο κομμάτι του ιμάντα έρθει μπροστά από το σύστημα ακίδων ②, τα φορτία μεταφέρονται στην μεταλλική σφαίρα ① η οποία φορτίζεται θετικά. Τα θετικά φορτία κατανέμονται ομοιόμορφα στην επιφάνεια της σφαίρας όπως συμβαίνει σε όλους τους αγωγούς. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται με το αφόρτιστο κομμάτι του ιμάντα να επιστρέφει κάτω, να συλλέγει θετικό φορτίο από το ⑦ και το οποίο στην συνέχεια, καθώς μεταφέρεται προς τα πάνω, συλλέγεται από το ②. Η επιθυμητή τιμή φορτίου στην σφαίρα καθορίζεται από το τροφοδοτικό των 50 kV. Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να εναποτεθεί στην μεταλλική σφαίρα εξαρτάται από το μέγεθος της. Εάν το φορτίο αυξηθεί περαιτέρω, όλο



Σχήμα 2.2: Τα βασικά μέρη της γεννήτριας Van de Graaff. Η επεξήγηση τους δίνεται στο κείμενο.

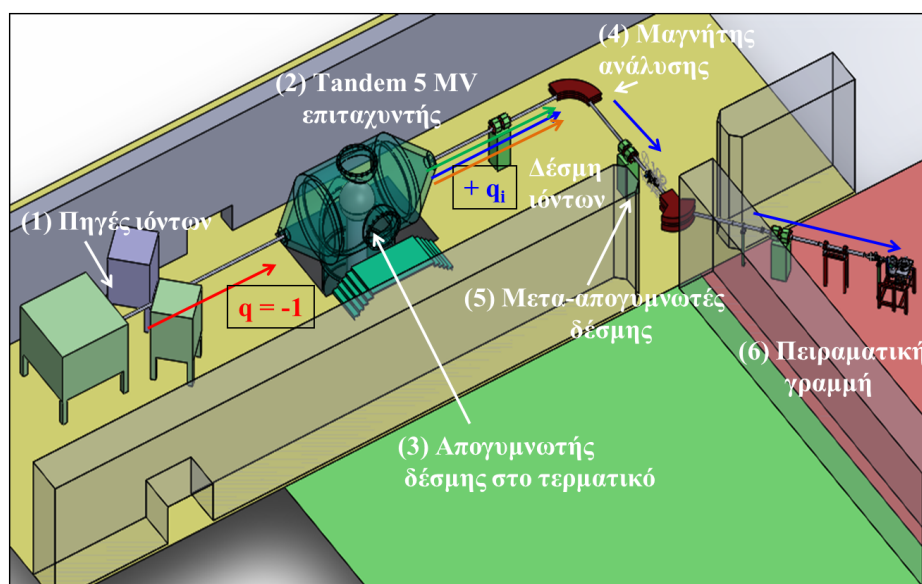
το σύστημα καταρρέει και η σφαίρα εκφορτίζεται. Για να αποτρέπονται τέτοια συμβάντα στα συστήματα επιταχυντών όλο το σύστημα βρίσκεται εντός ενός θαλάμου από ατσάλι γεμάτου με αέριο SF₆ σε πίεση 5 atm [1, 7].

2.2.2 Βασικά χαρακτηριστικά και αρχές λειτουργίας επιταχυντών τύπου Tandem Van de Graaff.

Οι επιταχυντές Van de Graaff βασίζονται στην ηλεκτροστατική έλξη ή άπωση μεταξύ ετερόσημα ή ομόσημα φορτισμένων σωμάτων. Την δεκαετία του 1950 αναπτύχθηκαν οι πηγές αρνητικών ιόντων (δέσμες τα ιόντα των οποίων έχουν ένα παραπάνω ηλεκτρόνιο από ότι στην ουδέτερη κατάσταση). Αυτή η εξέλιξη έδωσε την δυνατότητα κατασκευής



Σχήμα 2.3: Ο επιταχυντής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε “Δημόκριτος”.



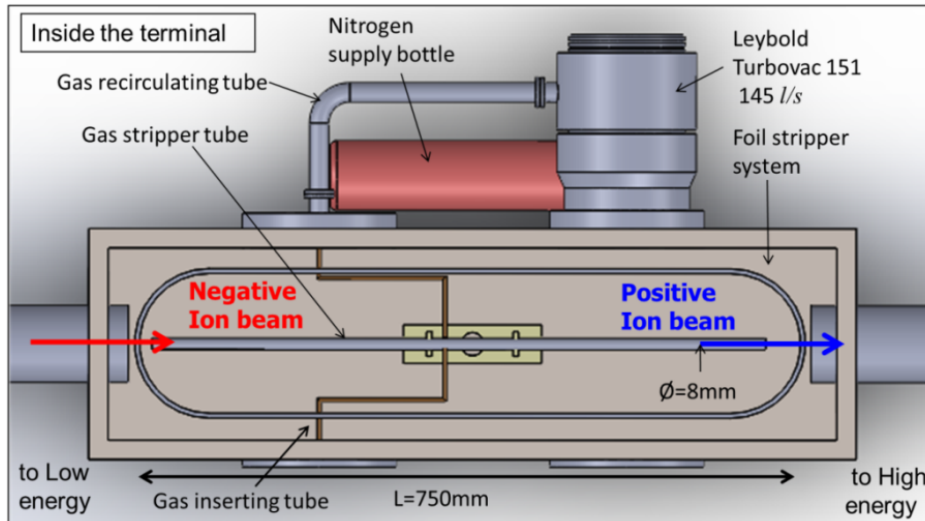
Σχήμα 2.4: Γραφική απεικόνιση του δωματίου του επιταχυντή και των δωματίων πειραμάτων του εργαστηρίου της TANDEM. Στο σχήμα φαίνεται η πορεία μιας τυχαίας δέσμης ιόντων.

επιταχυντών δύο - σταδίων (tandem). Σε έναν επιταχυντή tandem η υψηλή τάση της γεννήτριας χρησιμοποιείται δύο φορές [1].

Τα αρνητικά ιόντα που δημιουργούνται στην πηγή ($Q = -1$) έλκονται από την θετικά φορτισμένη σφαίρα και επιταχύνονται κερδίζοντας ενέργεια $E = VQ$. Στην συνέχεια διέρχονται μέσα από μέσο στο τερματικό του επιταχυντή με το οποίο συγκρούονται και το φορτίο τους διαφοροποιείται. Στην περίπτωση που το φορτίο του ιόντος παραμείνει $Q = -1$, όση ενέργεια κέρδισε κατά την προσέγγισή του στην σφαίρα θα χαθεί σταδιακά, και θα εξέλθει του επιταχυντή με την αρχική ενέργεια E_0 που είχε κατά την προ-επιτάχυνση του στην πηγή. Στην περίπτωση που το ιόν χάσει ένα ηλεκτρόνιο θα μετατραπεί σε ουδέτερο και η ενέργεια με την οποία θα εξέλθει από τον επιταχυντή είναι $E = E_0 + VQ$. Τέλος, στην περίπτωση που το ιόν χάσει παραπάνω από ένα ηλεκτρόνιο θα μετατραπεί σε θετικό ιόν και θα επιταχυνθεί περαιτέρω αναλόγως του τελικού φορτίου του ιόντος

σύμφωνα με τον τύπο $E = E_0 + V(Q + 1)$ [1].

Οι μηχανισμοί ανταλλαγής φορτίου κατά την κρούση ιόντων - ατόμων περιγράφονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια παρακάτω. Στην συνέχεια το επιθυμητό ιόν και η αντίστοιχη ενέργεια επιλέγεται, καθώς το σύνολο της δέσμης διέρχεται μέσα από έναν μαγνήτη ανάλυσης (analyzing magnet) ο οποίος έχει το απαιτούμενο μαγνητικό πεδίο, έτσι ώστε να περάσει μόνο η επιθυμητή κατάσταση, αποκόπτοντας τις υπόλοιπες οι οποίες διαγράφουν τροχιές διαφορετικής καμπυλότητας.

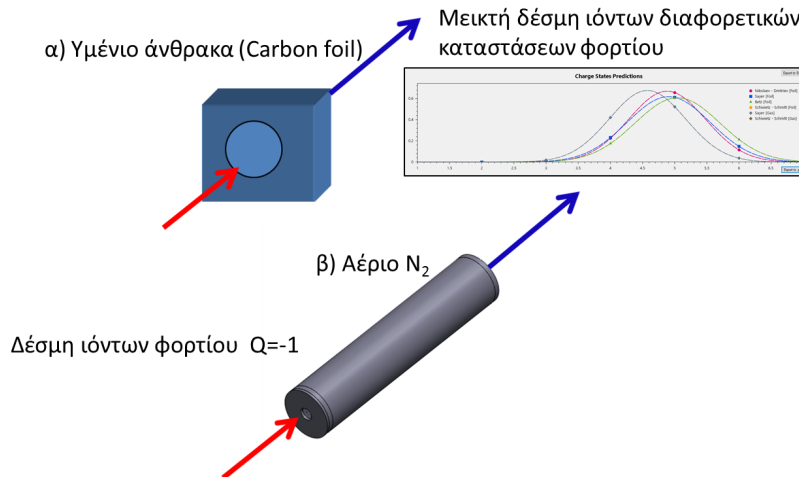


Σχήμα 2.5: Το τερματικό ενός τυπικού επιταχυντή Tandem Van de Graaff. Παρατηρείται ότι διαθέτει δύο μηχανισμούς απογύμνωσης α) με στερεό και β) με αέριο μέσο.

2.3 Η τεχνική της απογύμνωσης ιόντων

Η τεχνική της απογύμνωσης ιόντων χρησιμοποιείται στους επιταχυντές τύπου Tandem Van de Graaff για την επίτευξη δύο σταδίων επιτάχυνσης των ιόντων. Όταν ένα επιταχυνόμενο ιόν εισέρχεται στο τερματικό του επιταχυντή, θα διέλθει μέσα από ένα υλικό, στερεό ή αέριο, με το οποίο είναι πιθανό να πραγματοποιήσει κρούσεις και πιθανότατα να χάσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια. Στην περίπτωση που το τελικό φορτίο του ιόντος είναι θετικό, θα επιταχυνθεί περαιτέρω λόγω της απωστικής δύναμης που του ασκείται από την θετικά φορτισμένη σφαίρα στο κέντρο του επιταχυντή. Χωρίς αυτήν την τεχνική το φορτίο του ιόντος θα παρέμενε $Q = -1$ με αποτέλεσμα όση ενέργεια κερδίσει κατά την προσέγγιση του στο κέντρο της θετικά φορτισμένης σφαίρας, να το χάσει κατά την απομάκρυνσή του από αυτή [2, 3, 8].

Στο σχ. 2.5 μπορούμε να δούμε μια σχηματική απεικόνιση ενός τερματικού επιταχυντή τύπου Tandem Van de Graaff. Το συγκεκριμένο σχήμα αναπαριστά το τερματικό του επιταχυντή του εργαστηρίου της TANDEM ύστερα από την πιο πρόσφατη προσθήκη ενός απογυμνωτή ηλεκτρονίων αερίου συνοδευόμενο από ένα σύστημα ανακύκλωσης του απογυμνωτικού αερίου. Προηγούμενες εφαρμογές του συστήματος ανακύκλωσης



Σχήμα 2.6: Η τεχνική της απογύμνωσης ιόντων δέσμης α) με φύλλο άνθρακα και β) με αέριο.

έδειξαν σαφή περιορισμό του αερίου εντός του τερματικού [9]. Μια σχηματική αναπαράσταση των δύο μεθόδων απογύμνωσης της δέσμης ιόντων φαίνεται στο σχ. 2.6.

2.3.1 Μηχανισμοί ανταλλαγής φορτίου κατά την κρούση ιόντων - ατόμων.

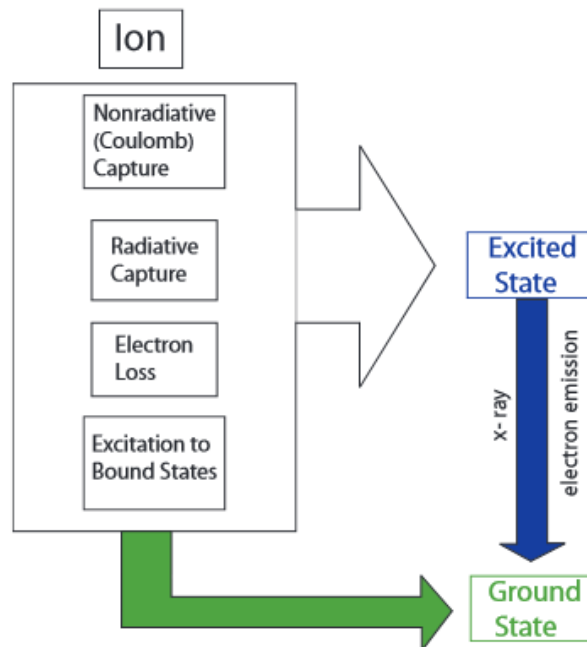
Όταν ταχέως κινούμενα ιόντα διέρχονται μέσα από κάποιο υλικό το φορτίό τους διαφοροποιείται λόγω δέσμευσης ή απώλειας ηλεκτρονίων, δημιουργώντας μια δυναμικά σταθερή κατανομή φορτισμένων καταστάσεων χωρίς να επηρεάζεται η ταχύτητα των ιόντων. Η κατανομή αυτών των καταστάσεων διαμορφώνεται σύμφωνα με την ενεργό διατομή των μηχανισμών απώλειας ή δέσμευσης ηλεκτρονίων.

Οι πιο βασικές διαδικασίες ανταλλαγής φορτίου σε ατομικές κρούσεις είναι η δέσμευση ή η απώλεια ηλεκτρονίων. Όταν ένα ιόν με φορτίο Q συγκρουστεί με ένα άτομο, διάφορες διαδικασίες μπορούν να συμβούν οι οποίες θα αλλάξουν το φορτίο του ιόντος σε Q' . Στο σχ. 2.7 φαίνονται οι διαφορετικές διαδικασίες που μπορούν να συμβούν σε ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια κατά την κρούση ιόντων με άτομα σύμφωνα με τον H. D. Betz [2, 3].

1. Δέσμευση ηλεκτρονίου χωρίς ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας (Nonradiative Electron Capture):

Το ιόν δεσμεύει ένα ή περισσότερα δέσμια ηλεκτρόνια από το άτομο-στόχο στην βασική ή σε κάποια διεγερμένη κατάσταση. Εάν ένα ηλεκτρόνιο μεταφερθεί από ένα άτομο του στόχου σε ένα ταχέα κινούμενο ιόν, το ηλεκτρόνιο πρέπει να έχει συνιστώσες ορμής τέτοιες που να είναι αντίστοιχες και να ταιριάζουν την υψηλή ορμή της δέσμης ιόντων [10].

2. Δέσμευση ηλεκτρονίου με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας (Radiative Electron Capture):

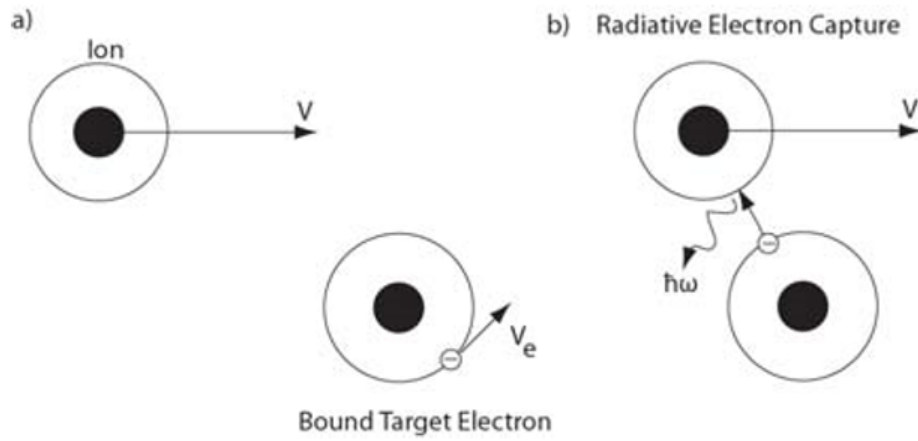


Σχήμα 2.7: Οι διαδικασίες που ο H.D. Betz [2, 3] θεώρησε ως θεμελιώδεις μηχανισμούς ανταλλαγής φορτίου.

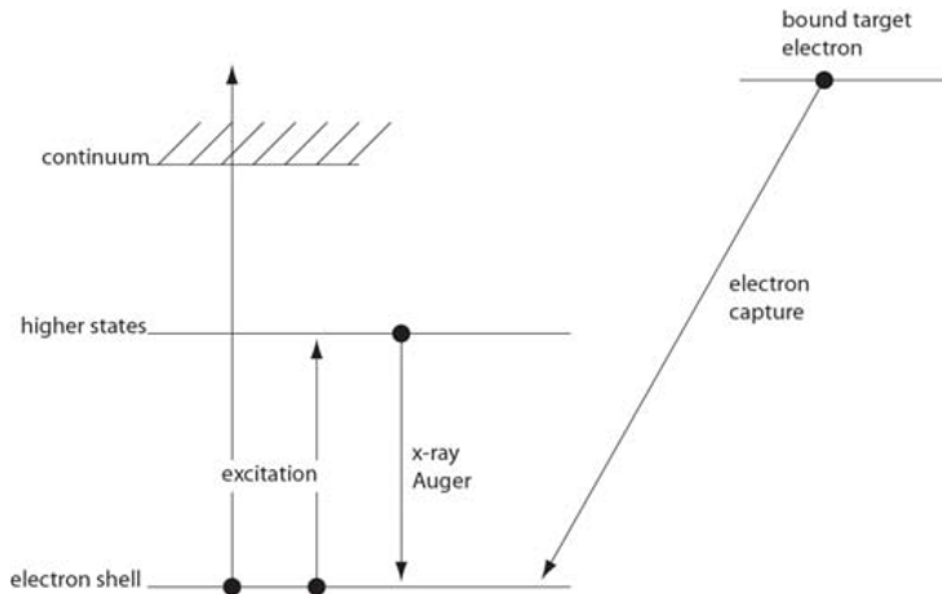
Το ιόν δεσμεύει ένα ελεύθερο ή δέσμιο ηλεκτρόνιο στην βασική ή σε κάποια διεγερμένη κατάσταση συνοδευόμενο με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου βλ.σχ. 2.8. Αυτή η ανταγωνιστική διαδικασία δέσμησης ηλεκτρονίου δεν έχει περιορισμούς στην ορμή και την ενέργεια μιας και η εκπομπή του φωτονίου δρα ως ένα τρίτο σώμα το οποίο μεταφέρει μακριά ενέργεια και ορμή, ταιριάζοντας τις παραμέτρους που απαιτούνται για την δέσμηση του ηλεκτρονίου [10].

3. Διέγερση στο συνεχές του φάσματος (Excitation to the continuum):

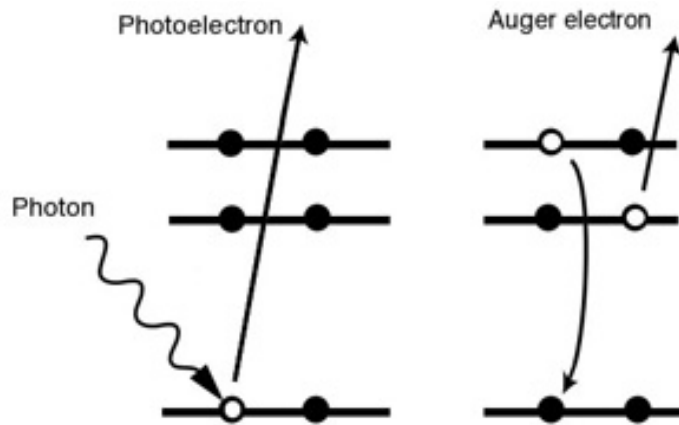
Το ιόν χάνει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια, αφήνοντας το ιόν στην βασική ή σε κάποια διεγερμένη κατάσταση. Ιόντα τα οποία έχουν μόνο ένα διεγερμένο ηλεκτρόνιο επιστρέφουν συνήθως γρήγορα στην θεμελιώδη κατάσταση, ωστόσο μετασταθείς καταστάσεις οι οποίες έχουν μεγάλους χρόνους ζωής μπορούν να παραχθούν. Υπάρχει μια συγκεκριμένη πιθανότητα τα ιόντα να είναι ακόμα διεγερμένα όταν μια επόμενη κρούση συμβαίνει. Έτσι ένα ιόν το οποίο έχει μείνει σε διεγερμένη κατάσταση μπορεί να αποδιεγερθεί μέσω εκπομπής Auger, προκαλώντας ιονισμό σε δεύτερο χρόνο από την κρούση. Το φαινόμενο Auger είναι μεταφορά ενός ηλεκτρονίου από υψηλότερη ενεργειακή στάθμη σε μία χαμηλότερη, για την συμπλήρωση κάποιας οπής, όπου η περίσσεια ενέργεια αποβάλλεται μέσω της εκπομπής ενός ηλεκτρονίου όπως φαίνεται στο σχ. 2.10 [10].



Σχήμα 2.8: Ο Μηχανισμός δέσμευσης ηλεκτρονίου με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.9: Δημιουργία και συμπλήρωση μιας οπής εσωτερικής στοιβάδας με δέσμευση ενός ηλεκτρονίου από το στόχο.



Σχήμα 2.10: Οι δύο μηχανισμοί διέγερσης ενός ηλεκτρονίου στο συνεχές του φάσματος α) με αλληλεπίδραση με φωτόνιο και β) με αλληλεπίδραση δυο ηλεκτρονίων και εκπομπή ηλεκτρονίου Auger.

Κεφάλαιο 3

Η πρωτοβουλία της πειραματικής ομάδας του APAPES

3.1 Εισαγωγή

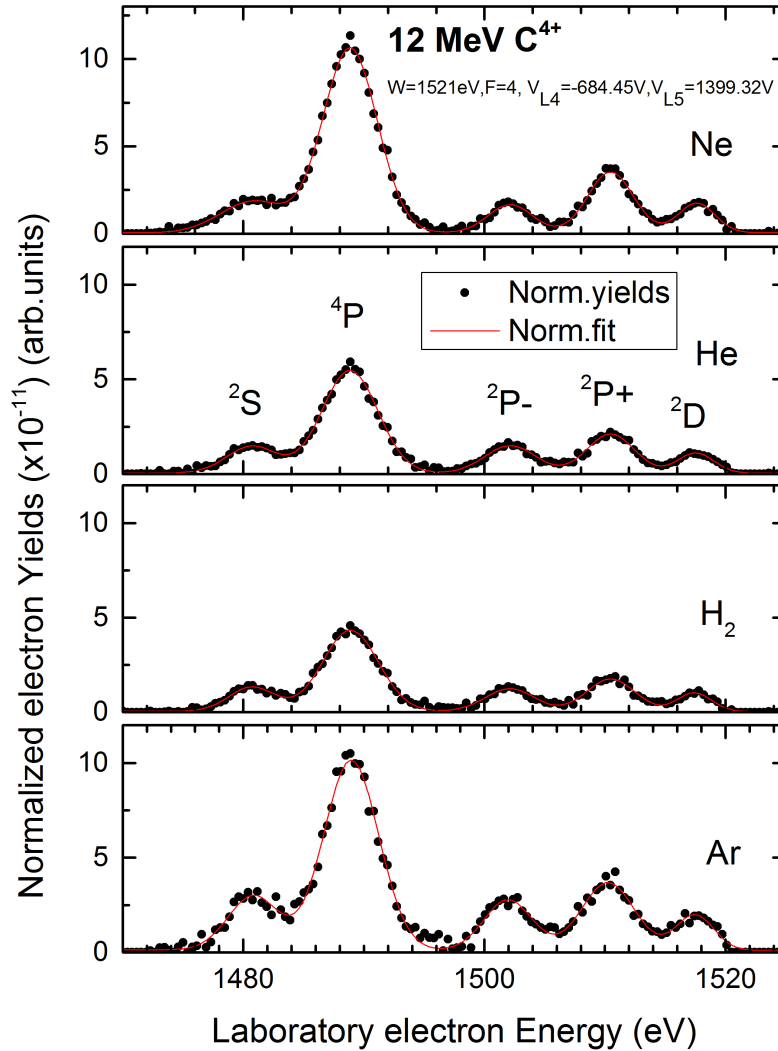
Η πρωτοβουλία APAPES - Atomic Physics with Accelerators: Projectile Electron Spectroscopy (<http://apapes.physics.uoc.gr/>) - Ατομική Φυσική με Επιταχυντές: Φασματοσκοπία ηλεκτρονίων Ιόντων Δέσμης, στον Επιταχυντή TANDEM του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε “Δημόκριτος” ξεκίνησε το 2011 από τον Καθηγητή του Πανεπιστημίου Κρήτης κ. Θεόδωρο Τζούρο ο οποίος είχε την ιδέα της δημιουργίας μιας πειραματικής ομάδας ατομικής φυσικής, της πρώτης στην Ελλάδα, στο εργαστήριο του επιταχυντή TANDEM του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε “Δημόκριτος”, με αντικείμενο την φασματοσκοπία ηλεκτρονίων Auger 0° μοιρών [6] και συγχρηματοδότηση από το πρόγραμμα ΘΑΛΗΣ¹. Έτσι, η υλοποίηση αυτής της ιδέας ξεκίνησε στα τέλη του 2011 από μηδενική βάση με την προσθήκη της πειραματικής γραμμής $L45$ αποκλειστικά για φασματοσκοπία ηλεκτρονίων δέσμης ιόντων στο εργαστήριο TANDEM.

3.2 Η φασματοσκοπία ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης

Μια τυπική πειραματική διάταξη για φασματοσκοπία ηλεκτρονίων Auger 0° παρουσιάζεται στο σχ. 3.2. Η ονομασία αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι ανιχνεύονται ηλεκτρόνια τα οποία εκπέμπονται στις 0° ως προς την διεύθυνση της δέσμης. Η δέσμη ιόντων εισέρχεται στο διαφορικά αντλούμενο κελί που περικλείει τον αέριο-στόχο και συγκρούεται με αυτό. Στην περίπτωση μας, εντός του 50 mm σε μήκος κελιού αναπτύσσονται πιέσεις 5-40 mTorr. Η πίεση μεταβάλλεται έτσι ώστε να φροντίζουμε πάντοτε να έχουμε συνθήκες μίας και μόνο κρούσης [11]. Η δέσμη ιόντων στην συνέχεια διέρχεται μέσα από το φασματόμετρο, εξέρχεται από το πίσω μέρος του και στην συνέχεια συλλέγεται στο τέλος σε ένα κλωβό Faraday (Faraday cup). Ένας αρκετά μεγάλος αριθμός ιόντων απαιτείται έτσι ώστε να ληφθεί ένα φάσμα καλής ποιότητας. Στην περίπτωση μας ένα

¹Η ανακοίνωση για τις επιτυχείς προτάσεις έγινε από την ΓΓΕΤ στις 6/10/2011

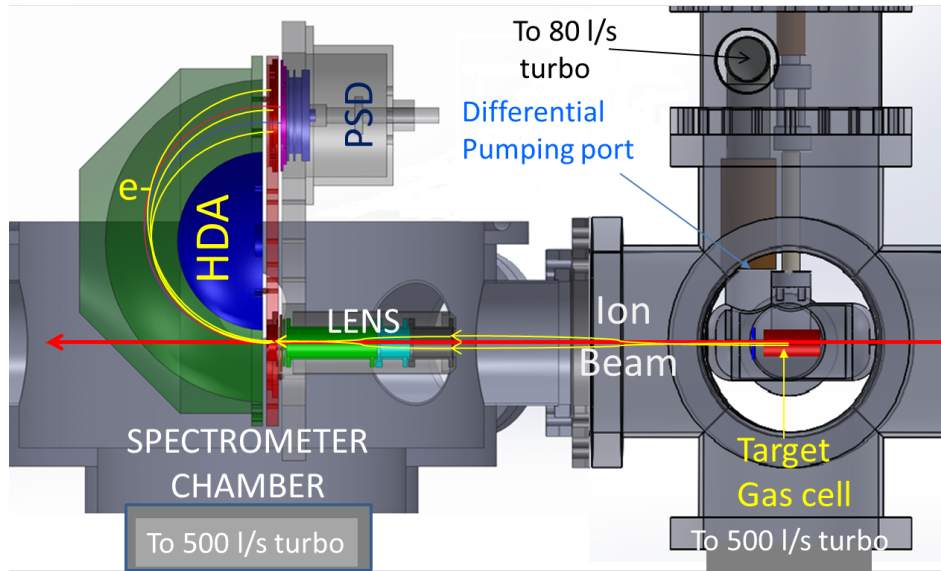
καλό φάσμα όπως αυτά που παρουσιάζονται στο σχ. 3.1 μπορεί να ληφθεί σε μερικά μόλις λεπτά της ώρας.



Σχήμα 3.1: Τυπικά φάσματα άνθρακα φασματοσκοπίας ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης σε κρούσεις 12 MeV C⁴⁺ με τα αέρια Ne, He, H₂, και Ar.

Τα ηλεκτρόνια Auger που εκπέμπονται ακαριαία μέσα από το κελί και αυτά που παράγονται κατά την πορεία της δέσμης προς τον αναλυτή από μετασταθείς καταστάσεις ή ακόμα και μέσα σε αυτόν, αναλύονται ενεργειακά με την βοήθεια ενός ημισφαιρικού αναλυτή οι ιδιότητες του οποίου περιγράφονται παρακάτω. Τα ηλεκτρόνια μπορούν να επιβραδυνθούν πριν εισέλθουν στον αναλυτή για την επίτευξη μεγαλύτερης διακριτικής

ικανότητας στο φάσμα. Η διακριτική ικανότητα $R = \Delta E/E$ εξαρτάται καθαρά από τις γεωμετρικές παραμέτρους του αναλυτή που παραμένουν σταθερές, συνεπώς μειώνοντας την ενέργεια E μειώνεται αναγκαστικά και η ΔE . Ο παράγοντας επιβράδυνσης F ορίζεται ως $F = E/E_{pass}$, όπου E_{pass} είναι η ενέργεια των ηλεκτρονίων μετά από την επιβράδυνση που υφίστανται από την αρχική ενέργεια E [11].

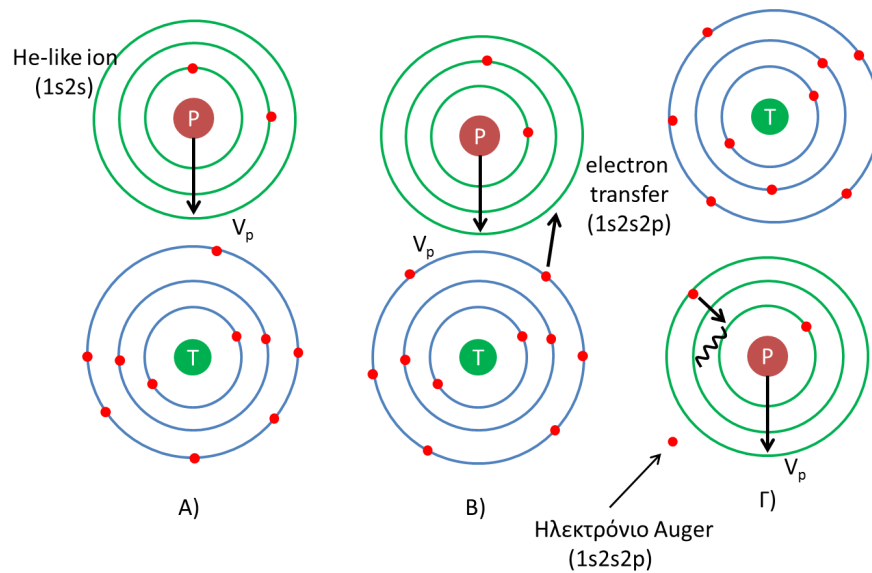


Σχήμα 3.2: Το σύστημα στόχου, αναλυτή, ανιχνευτή.

3.2.1 Διαδικασίες μεταφοράς ηλεκτρονίων και παραγωγή ηλεκτρονίων Auger

Σε μία κρούση μεταξύ ενός ιόντος και ενός ατόμου ένα σύνολο από διαφορετικές διαδικασίες θα συμβούν, η κάθε μία με διαφορετική πιθανότητα. Στην περίπτωση που μελετάμε το φαινόμενο που θεωρείται κυρίαρχο είναι η δέσμευση ενός ηλεκτρονίου του στόχου, από ένα ταχέως κινούμενο ιόν της δέσμης, φαινόμενο γνωστό ως σύλληψη (capture). Το ηλεκτρόνιο αυτό κατά πάσα πιθανότητα θα δεσμευθεί σε κάποια εξωτερική στοιβάδα του ιόντος της δέσμης, η οποία στα πειράματά μας είναι ηλιοειδής, (δηλ. έχει μόνο δύο ηλεκτρόνια). Στην συνέχεια θα αποδιεγερθεί προς μια στάθμη χαμηλότερης ενέργειας και αποδίδοντας την περίσσεια ενέργεια είτε μέσω εκπομπής ενός φωτονίου, είτε μέσω ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης σε ένα από τα άλλα δύο ηλεκτρόνια του ιόντος, προσδίδοντας του ικανή ενέργεια έτσι ώστε να εκπεμφθεί μακριά από την έλξη του πυρήνα. Ο μηχανισμός αυτός είναι γνωστός ως φαινόμενο Auger.

Μια άλλη κατηγορία διαδικασιών που μπορούν να συμβούν, ομαδοποιούνται σε αυτό που ονομάζουμε διαδικασίες μεταφοράς και διέγερσης, (Transfer and Excitation processes, TE). Σε αυτές της διαδικασίες έχουμε μεταφορά ενός ηλεκτρονίου του στόχου σε ένα ιόν της δέσμης, με ταυτόχρονη διέγερση του ενός εκ των δύο ηλεκτρονίων του

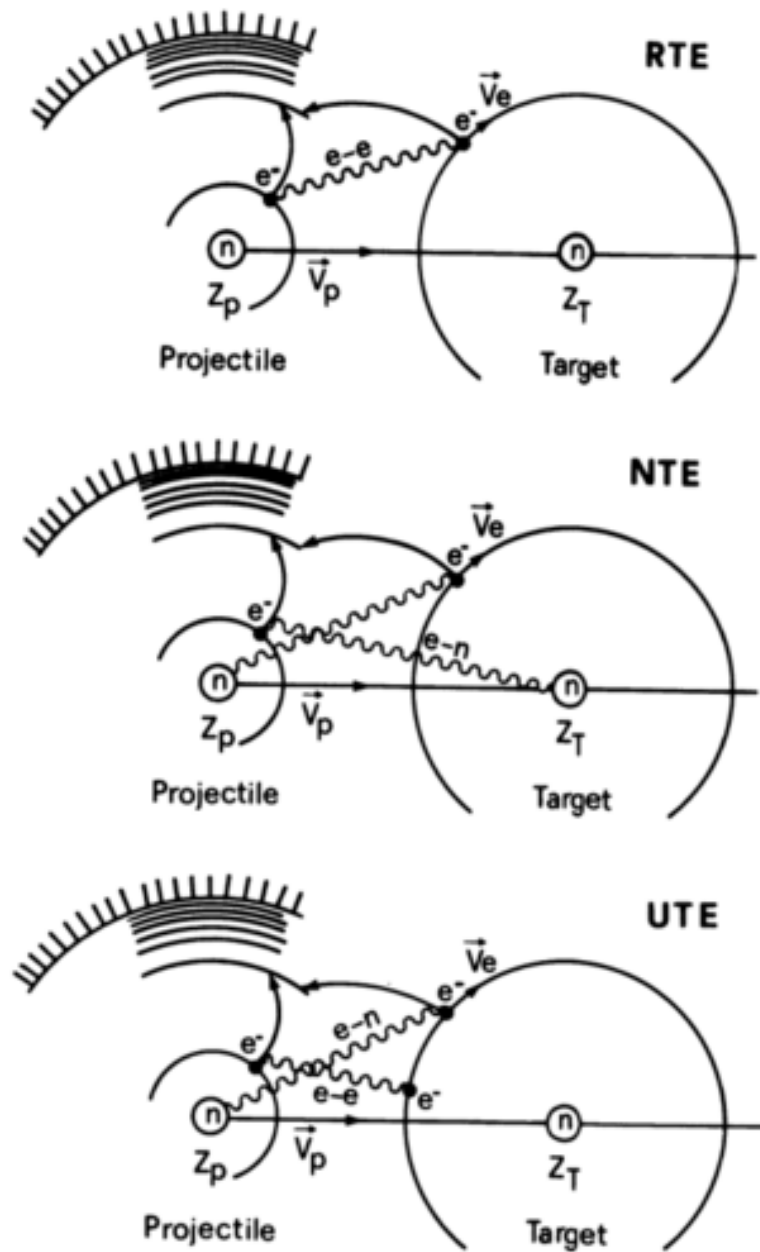


Σχήμα 3.3: Τα στάδια παραγωγής ηλεκτρονίων Auger ιόντων δέσμης. Διακρίνονται οι στοιβάδες των ατόμων, με τα ηλεκτρόνια σε κόκκινο χρώμα και τους πυρήνες στο κέντρο. Α) Το ιόν της δέσμης P προσεγγίζει με ταχύτητα V_p το άτομο-στόχο T. Β) Το ιόν της δέσμης P δεσμεύει ένα ηλεκτρόνιο του στόχου T σε εξωτερική στοιβάδα. Γ) Το ιόν της δέσμης P συνεχίζει την πορεία του. Το ηλεκτρόνιο στην εξωτερική στοιβάδα αποδιεγείρεται στην βασική αλληλεπιδρώντας με ένα από τα άλλα ηλεκτρόνια μεταφέροντας του ικανό ποσό ενέργειας για να εκπεμφθεί μακριά από τον πυρήνα.

ιόντος σε υψηλότερη στάθμη. Η διεργασία αυτή μπορεί να έχει τρεις μορφές. Αυτές είναι:

- Η Συντονισμένη Μεταφορά και Διέγερση (Resonant Transfer and Excitation, RTE). Κατά τη διαδικασία αυτή έχουμε αλληλεπίδραση μεταξύ ενός ηλεκτρονίου του στόχου και ενός ηλεκτρονίου του ιόντος της δέσμης, με αποτέλεσμα την μεταφορά του ηλεκτρονίου από το στόχο στο ιόν και την ταυτόχρονη διέγερση του ηλεκτρονίου του ιόντος σε υψηλότερη στάθμη σχ. 3.4 (πάνω).
- Η Μη-Συντονισμένη Μεταφορά και Διέγερση (Non-Resonant Transfer and Excitation, NTE). Κατά τη διαδικασία αυτή το ηλεκτρόνιο που μεταφέρεται από το στόχο στο ιόν της δέσμης αλληλεπιδρά με τον πυρήνα του ιόντος της δέσμης και ένα ηλεκτρόνιο του ιόντος αλληλεπιδρά με τον πυρήνα του στόχου και διεγείρεται σε υψηλότερη στάθμη σχ. 3.4 (κέντρο).
- Η Ασυσχετίστη Μεταφορά και Διέγερση (Uncorrelated Transfer and Excitation, UTE). Κατά τη διαδικασία αυτή το ηλεκτρόνιο που μεταφέρεται από το στόχο στο ιόν της δέσμης αλληλεπιδρά με τον πυρήνα του ιόντος της δέσμης και ένα ηλεκτρόνιο του ιόντος αλληλεπιδρά με ένα δεύτερο ηλεκτρόνιο του πυρήνα του στόχου και διεγείρεται σε υψηλότερη στάθμη σχ. 3.4 (κάτω). Η τελευταία διαδικασία προϋποθέτει την ύπαρξη τουλάχιστον δύο ηλεκτρονίων στο άτομο του στόχου [11].

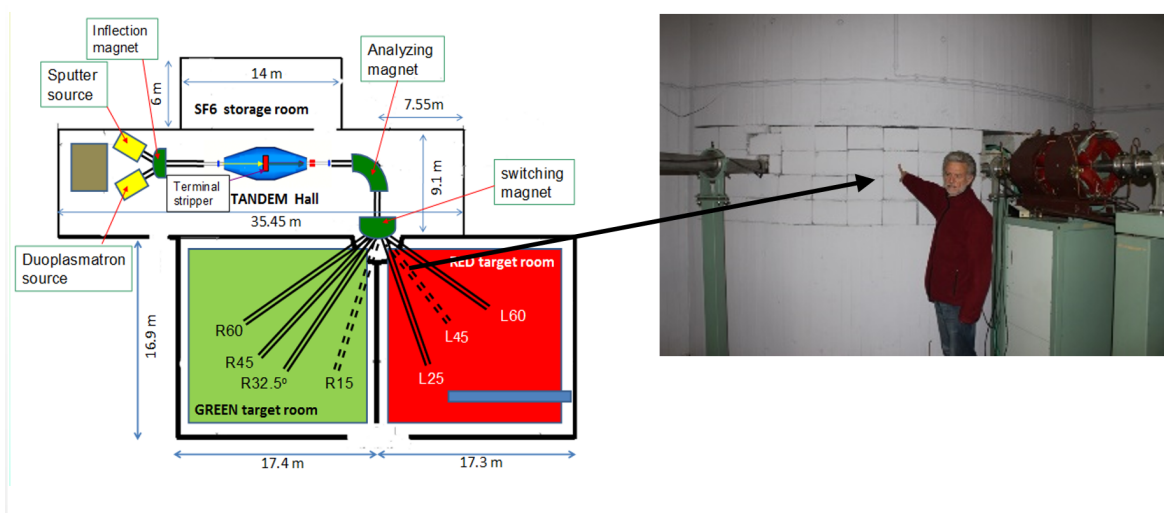
Transfer Excitation Processes



Σχήμα 3.4: Οι διαδικασίες μεταφοράς και διέγερσης, (Transfer and Excitation processes) [11].

3.3 Τα κύρια μέρη της πειραματικής διάταξης του APAPES

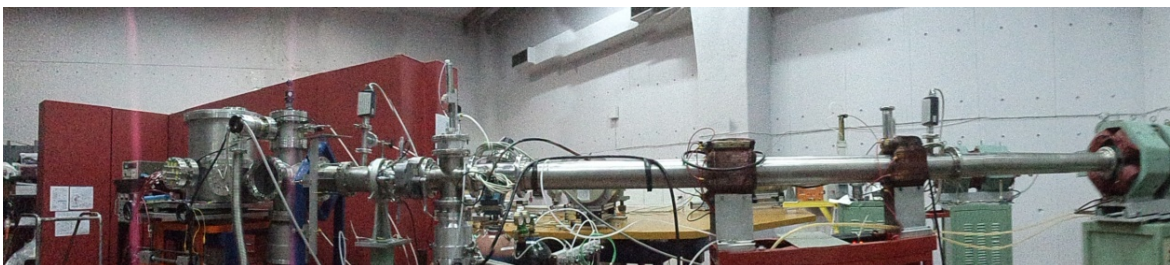
Η πειραματική γραμμή του APAPES ξεκίνησε να κατασκευάζεται στα τέλη του 2011. Αποτελείται από α) τον ανοξείδωτο ατσάλινο σωλήνα μέσα στον οποίο κινείται υπό κενό η δέσμη ιόντων, β) ένα μαγνήτη - “τετράπολο” για την εστίαση της δέσμης, γ) δυο μαγνητικοί κατευθυντήρες δέσμης (magnetic steerers) οι οποίοι δίνουν την δυνατότητα μικρών διορθωτικών αλλαγών στην κατεύθυνση της δέσμης, δ) δύο κλωβούς Faraday (Faraday Cups) τα οποία δίνουν την δυνατότητα της μέτρησης του ρεύματος της δέσμης ιόντων σε διαφορετικά σημεία της πειραματικής γραμμής πριν και μετά την μέτρηση, ε) το κελί μέσα στο οποίο διοχετεύεται το αέριο-στόχος, στ) ένα σύστημα τροφοδοτικών τα οποία παρέχουν τις κατάλληλες τάσεις ακριβείας στον ημισφαιρικό αναλυτή, στον ηλεκτροστατικό φακό και σε άλλα σημεία του πειράματος, ζ) τον ημισφαιρικό αναλυτή και τέλος η) το σύστημα του ανιχνευτή (position sensitive detector - PSD) μαζί με το σύστημα προενισχυτή και το σύστημα ψηφιοποίησης του σήματος, Data Acquisition system (DAQ). Στις εικόνες 3.5 και 3.6 φαίνονται τα αρχικά στάδια τοποθέτησης της νέας πειραματικής γραμμής L45 και ολοκληρωμένη η πειραματική γραμμή του APAPES.



Σχήμα 3.5: Η δημιουργία της πειραματικής γραμμής L45 του APAPES. Στην εικόνα φαίνεται ο κ. Θεόδωρος Τζούρος, συντονιστής του προγράμματος APAPES να δείχνει το σημείο που εξήλθε η γραμμή L45 του APAPES.

3.4 Το κελί του αερίου στόχου

Το κελί του αερίου στόχου αποτελείται από δύο ομόκεντρους κυλίνδρους. Ο εσωτερικός κύλινδρος είναι 50 mm σε μήκος και έχει εξωτερική διάμετρο 25 mm, ενώ ο εξωτερικός κύλινδρος είναι 140 mm σε μήκος και έχει εξωτερική διάμετρο 63 mm. Οι δύο κύλινδροι είναι από ανοξείδωτο ατσάλι και είναι ηλεκτρικά απομονωμένοι μεταξύ τους.



Σχήμα 3.6: Η πειραματική γραμμή L45 του APAPES.

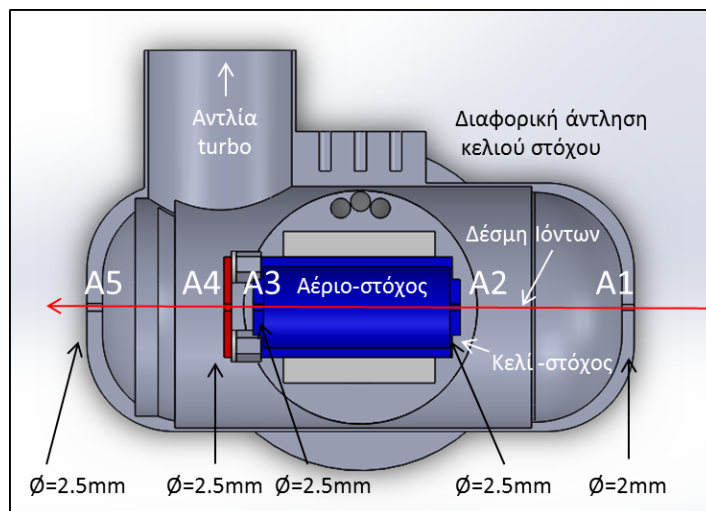
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά του κελιού αερίου-στόχου

Gas cell system		
Apertures (circular)	New Diameter (mm)	Old Diameter (mm)
A1 outer cell entrance	2.0	1.8
A2 inner cell entrance	2.5	1.7
A3 inner cell exit	2.5	1.8
A4 extra aperture	2.5	1.8
A5 outer cell exit	2.5	2.5
Inner cell length (outside dimension)	49.8	
Outer cell length (outside dimension)	140	
Inner cell diameter (outside dimension)	25	
Outer cell diameter (outside dimension)	63	

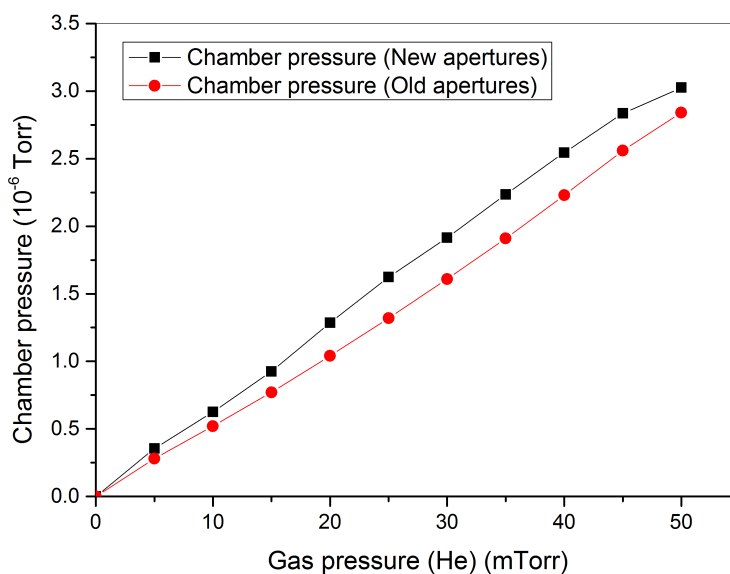
Κάθε ένας από τους κυλίνδρους έχει αποσπώμενες εισόδους - εξόδους των οποίων οι διάμετροι παρουσιάζονται στο πίνακα 3.1. Οι διάμετροι των εισόδων - εξόδων του κελιού επηρεάζουν το ποσό της δέσμης που διέρχεται μέσα από αυτό και αλληλεπιδρά με το αέριο - στόχο. Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι νέες και οι παλιές εισοδοί - εξοδοί του κελιού, ενώ στο σχ.3.8 παρουσιάζεται η διαφορά στις πιέσεις εντός του θαλάμου του αναλυτή κατά την παροχή διαφόρων πιέσεων αερίου στο κελί με τις νέες και τις παλιές εισόδους - εξόδους.

3.4.1 Η διαφορική άντληση του κενού

Η βασική ιδέα του διαφορικά αντλούμενου κελιού του αερίου στόχου αποτελείται από δύο ομόκεντρους κυλίνδρους. Έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό που τον περικλείει. Ο εξωτερικός κύλινδρος είναι συνδεδεμένος με μία μικρή στροβιλομοριακή αντλία κενού (80 l/s) η οποία αντλεί τον εσωτερικό του χώρο. Αυτό γίνεται για να αποφεύγεται η “ρύπανση” της πειραματικής γραμμής με το αέριο που χρησιμοποιείται ως στόχος με αποτέλεσμα να χαλάει το κενό στην πειραματική διάταξη. Όλο το σύστημα βρίσκεται πάνω σε ένα 6-πλο σταυρό από ανοξείδωτο ατσάλι. Στην κάτω φλάντζα του σταυρού είναι



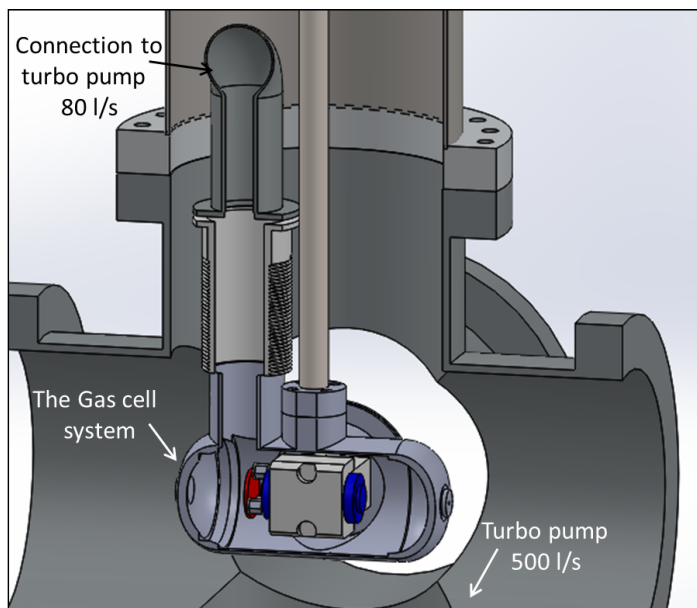
Σχήμα 3.7: Το διπλό κελί του αερίου-στόχου που χρησιμοποιείται στο πείραμα του APAPES για φασματοσκοπία ηλεκτρονίων Auger. Οι εισοδοί-εξοδοί της δέσμης ιόντων 1-5, έχουν διαμέτρους έως 2.5 mm έτσι ώστε να αποφεύγεται η διάχυση του αερίου έξω από το εξωτερικό κελί. Οι διαστάσεις δίνονται στον Πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.8: Σύγκριση πιέσεων εντός του πειραματικού θαλάμου συναρτήσεως της πίεσης παροχής αερίου εντός του κελιού - στόχου με τις νέες και τις παλιές εισόδους - εξόδους του κελιού. Στις δυο σειρές μετρήσεων θεωρήθηκε σαν μηδενική τιμή πίεσης εντός του θαλάμου η πίεση που αντιστοιχούσε στην μη παροχή αερίου στο κελί του στόχου.

τοποθετημένη ακόμα μια πολύ μεγαλύτερη στροβιλομοριακή αντλία (500 l/s) η οποία

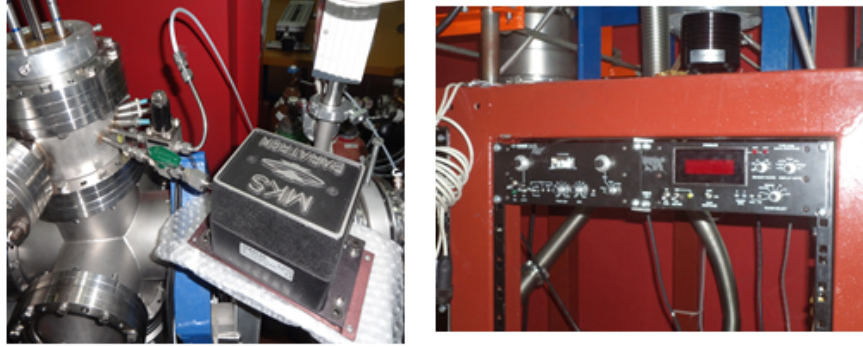
αντλεί τον χώρο για ακόμα καλύτερο κενό στην διάταξη σχ. 3.11.



Σχήμα 3.9: Ο μηχανισμός διαφορικής άντλησης αερίου.

3.4.2 Η παροχή του κελιού με το αέριο - στόχο

Από ότι γνωρίζουμε και από προηγούμενα πειράματα [12], τα φάσματα που προκύπτουν έχουν άμεση εξάρτηση από την πίεση του αερίου στόχου μέσα στο κελί. Πιο συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί ότι υψηλή πίεση μέσα στο κελί δημιουργεί αυξημένο υπόστρωμα στο φάσμα. Αυτό το γεγονός καθιστά αναγκαίο ένα σύστημα που να διατηρεί και να σταθεροποιεί την πίεση σε συγκεκριμένες απόλυτες τιμές. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιήθηκε ένας μετρητής απόλυτης πίεσης τύπου μανόμετρο πυκνωτή (capacitive manometer) της εταιρείας MKS Baratron [13] και μία βαλβίδα ελέγχου ροής αερίου. Η αρχή λειτουργίας αυτού του συστήματος βασίζεται σε μια δυναμική ισορροπία ροής αερίου στο κελί - στόχο. Η πίεση του αερίου μετράται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα μεταφέροντας την πληροφορία στην μονάδα του Baratron η οποία συνδέεται με την μονάδα ελέγχου της παροχής του αερίου. Η μονάδα ελέγχου της βαλβίδας ανταποκρίνεται στην πληροφορία που λαμβάνει από την μονάδα του Baratron και αυξάνει ή μειώνει την ροή του αερίου έτσι ώστε αυτή να παραμένει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Όλο το σύστημα έχει παροχή από τέσσερα διαφορετικά αέρια (H_2 , He, Ne, Ar) υψηλής καθαρότητας (99.999%) τα οποία μεταφέρονται μέσω ενός συστήματος πλαστικών σωλήνων.



Σχήμα 3.10: Το σύστημα σταθεροποίησης πίεσης αερίου στόχου.



Σχήμα 3.11: Το σύστημα παροχής των αερίων στόχου.

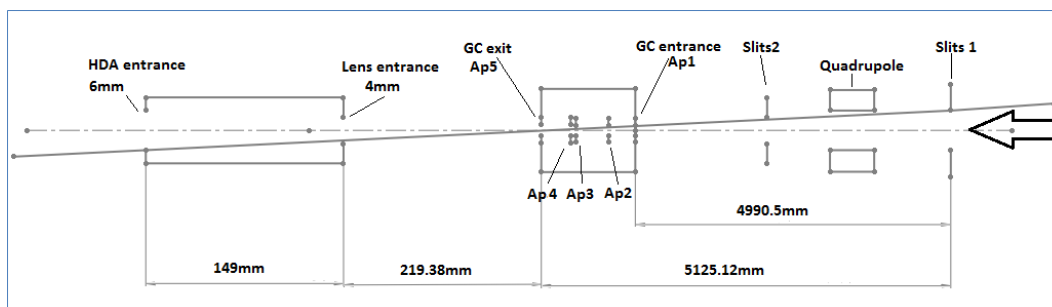
3.4.3 Η χρησιμότητα μιας βάσης ευθυγράμμισης στόχου μεγάλης ακρίβειας

Μία από τις ιδιαιτερότητες της πειραματικής γραμμής του APAPES είναι ότι χρησιμοποιεί στόχο σε αέρια κατάσταση. Το γεγονός αυτό δυσκολεύει τις πειραματικές συνθήκες συγκριτικά με τις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται στερεός στόχος. Αυτό συμβαίνει διότι το αέριο τείνει να διαχυθεί μέσα στην πειραματική γραμμή και να χαλάσει το απαραίτητο κενό για την διέλευση της δέσμης. Αυτό συμβαίνει επειδή τα ιόντα συγκρούονται

με τα μόρια του αερίου έτσι ακριβώς όπως συμβαίνει και σε συνθήκες ατμοσφαιρικού αέρα.

Η ανάγκη για μια βάση ευθυγράμμισης μεγάλης ακρίβειας προκύπτει από το γεγονός ότι χρησιμοποιείται ένα σύστημα διαφορετικά αντλούμενων κελιών τα οποία έχουν εισόδους-εξόδους διαμέτρων περίπου 2mm. Αυτό καθιστά αρκετά δύσκολη την διέλευση της δέσμης μέσα από το σύστημα των κελιών, και ακόμα πιο δύσκολη την διέλευση της χωρίς να προσπίπτει στα διαδοχικά τοιχώματα, γεγονός το οποίο πρέπει να αποφεύγεται μιας και δημιουργεί ηλεκτρόνια που μπορεί να συμβάλλουν στο υπόστρωμα στο πειραματικό φάσμα.

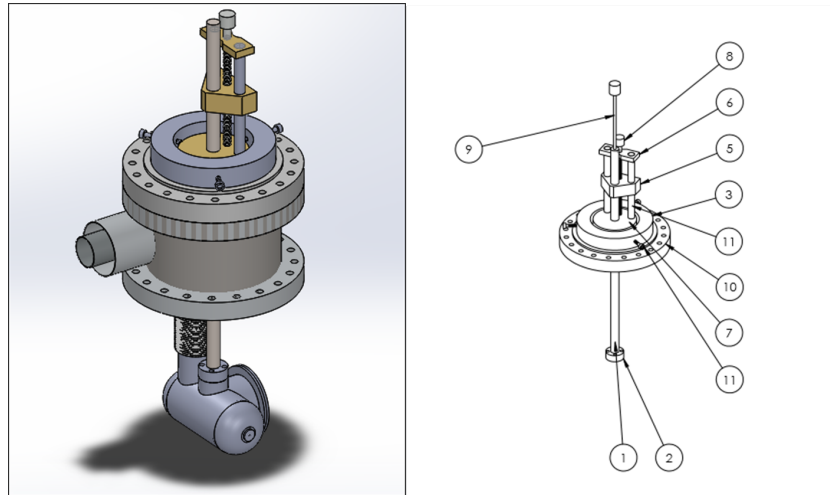
Στο σχ. 3.12 φαίνονται τα κύρια μέρη της πειραματικής διάταξης που λειτουργούν περιοριστικά στην διάδοση της δέσμης ιόντων. Με βάση τους περιορισμούς αυτούς έγινε μια μελέτη σχετικά με την διάδοση του μεγαλύτερου ποσού της δέσμης στην πορεία της από τα slits1 μέχρι την είσοδο του αναλυτή. Η μελέτη αυτή λαμβάνει υπόψιν μόνο τους γεωμετρικούς παράγοντες και όχι την εστιακή επίδραση που μπορεί να έχει στην δέσμη ιόντων ο μαγνήτης τετράπολο, η οποία λειτουργεί θετικά στη διάδοση περισσότερων ιόντων της δέσμης.



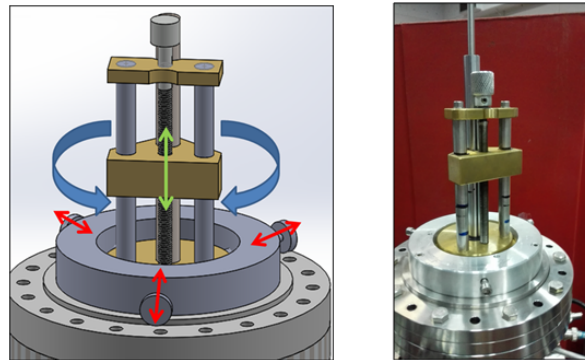
Σχήμα 3.12: Γεωμετρική μελέτη των συνθηκών ευθυγράμμισης του στόχου.

3.4.4 Η βάση ευθυγράμμισης του στόχου

Μια νέα βάση ευθυγράμμισης ακριβείας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με την προοπτική να έχει την δυνατότητα να μετατοπίζει το στόχο στο κατακόρυφο και στο οριζόντιο επίπεδο έτσι ώστε να μπορεί να ευθυγραμμιστεί πλήρως ο στόχος με την προσπίπτουσα δέσμη ιόντων. Στο σχ. 3.13 απεικονίζεται σε τριδιάστατη μορφή το σύστημα βάσης ευθυγράμμισης, διαφορετικής άντλησης κενού και στόχου. Ένα μέγεθος το οποίο μπορεί να μας δώσει μια εκτίμηση της χρησιμότητας της βάσης ευθυγράμμισης είναι το μετρούμενο ρεύμα ιόντων στο τελικό κλωβό Φαραντέι (Faraday Cup). Χαρακτηριστικό είναι ότι ενώ με την προηγούμενη βάση ευθυγράμμισης το ρεύμα στον στόχο ήταν της τάξεως των 2-3 nA, με την νέα βάση ευθυγράμμισης το ρεύμα αυξήθηκε στα 24 nA. Προς αυτήν την κατεύθυνση συνέβαλε επίσης η χρησιμοποίηση νέων εισόδων εξόδων του εξωτερικού και εσωτερικού κελιού με λίγο μεγαλύτερες διαμέτρους για την καλύτερη διέλευση της δέσμης. Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι παλιές και οι νέες διαμέτροι των εισόδων - εξόδων των κελιών. Αναλυτικά σχέδια της βάσης ευθυγράμμισης στόχου υπάρχουν στο παράρτημα Β'.1 της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 3.13: Το σύστημα βάσης ευθυγράμμισης-στόχου.

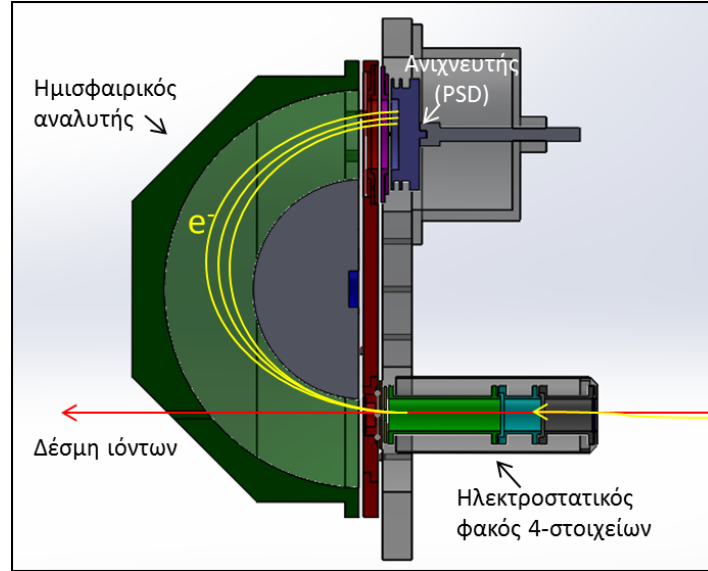


Σχήμα 3.14: Η νέα βάση ευθυγράμμισης του APAPES.

3.5 Το φασματόμετρο ηλεκτρονίων

Το φασματόμετρο φαίνεται στο σχ. 3.15. Αποτελείται από διαφορετικά κομμάτια όπως ένας ημισφαιρικός αναλυτής (Hemispherical Deflector Analyzer, HDA) [14], ένας ηλεκτροστατικός φακός τεσσάρων στοιχείων και ένας ανιχνευτής position sensitive detector (PSD) [15]. Ο αναλυτής αποτελείται από δύο ημισφαιρικά κελύφη με το εξωτερικό να έχει ακτίνα R_2 και το εσωτερικό R_1 , 130.8mm και 72.4mm, αντίστοιχα. Τα δύο κελύφη του αναλυτή είναι ηλεκτρικά απομονωμένα μεταξύ τους και τίθενται σε δύο κατάλληλα δυναμικά V_1 και V_2 τέτοια ώστε τα ηλεκτρόνια που εισέρχονται στον αναλυτή να υφίστανται δύναμη από το ηλεκτρικό πεδίο και να διαγράφουν καμπύλη τροχιά καταλήγοντας εστιασμένα ανάλογα την ενέργειά τους σε διαφορετικό σημείο πάνω στον ανιχνευτή θέσης. Ο φακός τεσσάρων στοιχείων εστιάζει τα ηλεκτρόνια της πηγής στην είσοδο του ημισφαιρικού αναλυτή, αυξάνοντας την συνολική στερεά γωνία αποδοχής ηλεκτρονίων του αναλυτή. Ο φακός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αύξηση της διακριτικής ικανότητας του φασματόμετρου, επιβραδύνοντας τα σωματίδια από μια αρχική ενέργεια T σε μια χαμηλότερη ενέργεια t ακριβώς πριν την είσοδο τους στον αναλυ-

τή [16].

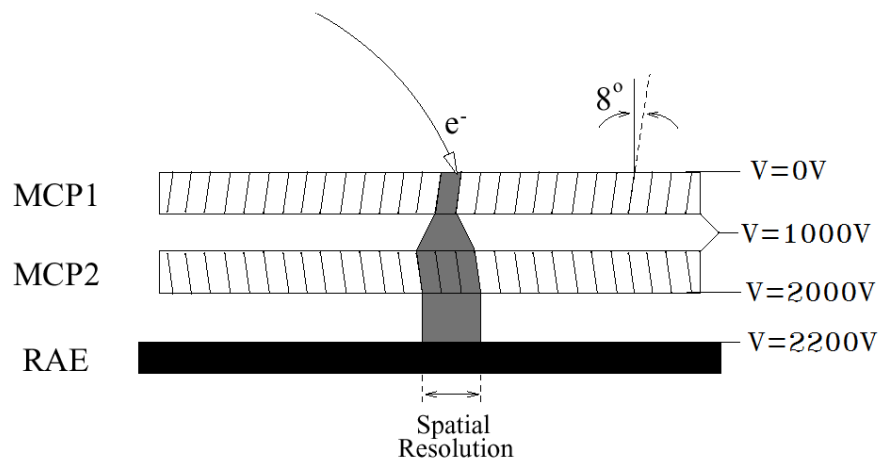


Σχήμα 3.15: Το φασματοόμετρο αποτελείμενο από τον ημισφαιρικό αναλυτή και τον ηλεκτροστατικό φακό τεσσάρων στοιχείων.

3.6 Ο ανιχνευτής

Ο ανιχνευτής που χρησιμοποιείται στην πειραματική διάταξη του APAPES είναι ένας δισδιάστατος ανιχνευτής θέσης (2-D Position Sensitive Detector, PSD), δηλαδή ένας ανιχνευτής δισδιάστατης απεικόνισης της θέσης των προσπίπτοντων σωματιδίων. Ο PSD αποτελείται από ένα σύστημα δυο πολυκαναλικών πλακών (Multi-Channel Plates, MCP) διαμέτρου 40mm οι οποίες δρουν ως ένα σύστημα ενίσχυσης του σήματος των προσπίπτοντων σωματιδίων με παρόμοια αρχή λειτουργίας με αυτή των δυνόδων 3.16. Ένας MCP είναι ένα σύστημα $\sim 10^4$ μικροδυνόδων, παράλληλες η μια στην άλλη [15].

Μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας των δυνόδων συνοψίζεται ως εξής. Ένα ηλεκτρόνιο που παράγεται λόγω της κρούσης ενός σωματιδίου στον ανιχνευτή αρχικά επιταχύνεται προς την πρώτη δύνοδο στην οποία και προσπίπτει. Από την πρόσπτωση αυτή εξάγονται κατά μέσο όρο δ ηλεκτρόνια, όπου $\delta = kV$, όπου k σταθερά του υλικού και V η διαφορά δυναμικού μεταξύ των διαδοχικών δυνόδων, με τυπική τιμή $\delta = 4$ ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά επιταχύνονται προς την δεύτερη δύνοδο και εξάγονται κατά μέσο όρο δ^2 ηλεκτρόνια κ.ο.κ, δηλαδή δ^n για την n -οστή δύνοδο. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου τα εξαχθέντα ηλεκτρόνια να συλλεχθούν από την άνοδο και συμβάλουν στην διαμόρφωση του τελικού σήματος (παλμού) εξόδου [17]. Μια πλάγια τομή των MCP κατά τη λειτουργία τους φαίνεται στο σχ. 3.16.



Σχήμα 3.16: Ο πολυκαναλικός ανιχνευτής.

Κεφάλαιο 4

Απογύμνωση ιόντων

4.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα του υπολογισμού των κατανομών φορτισμένων καταστάσεων που προκύπτουν από κρούσεις όταν μία δέσμη ιόντων διέρχεται από ένα μέσο απασχολεί από το 1940 [8], έως και στις μέρες μας [18]. Ακριβείς προβλέψεις πάνω στην διαμόρφωση των φορτισμένων καταστάσεων που προκύπτουν από την κρούση ιόντων με αέρια και στερεά μέσα ήταν απαραίτητες για τον σχεδιασμό νέων επιταχυντών και για την εκτίμηση των εξαγόμενων εντάσεων των διάφορων δεσμών φορτισμένων σωματιδίων [19].

Το φορτίο ενός ταχέως κινούμενου ιόντος το οποίο διέρχεται μέσα από κάποιο μέσο μεταβάλλεται, ως αποτέλεσμα δύο βασικών διαδικασιών ανταλλαγής φορτίου, της δέσμευσης (electron capture) ή της απώλειας (electron loss) ηλεκτρονίων. Στην δέσμευση ηλεκτρονίων η κατάσταση φορτίου q ενός ιόντος με ατομικό αριθμό Z μειώνεται κατά ένα όταν αποδέχεται ένα ηλεκτρόνιο από το στόχο - μέσο.



όπου $q \geq 0$.

Στην περίπτωση απώλειας ηλεκτρονίων η κατάσταση φορτίου q ενός ιόντος με ατομικό αριθμό Z αυξάνεται κατά ένα όταν αποδεσμεύεται ένα ηλεκτρόνιο.



όπου $q \geq -1$.

Υστερα από έναν ικανό αριθμό κρούσεων, μία κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των διαδικασιών δέσμευσης και απώλειας ηλεκτρονίων επιτυγχάνεται, η οποία εξαρτάται μόνο από το είδος των ιόντων, την ταχύτητά τους, το στόχο και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται αυτός (στερεή ή αέρια) [10].

4.2 Θεωρητικές μελέτες

Η πρώτη εκτενής θεωρητική μελέτη για την ανταλλαγή φορτίων παρουσιάστηκε από τον Bohr το 1948 [8]. Παρουσίασε αναλυτικές εκφράσεις για την δέσμευση ή απώλεια ενός ηλεκτρονίου από ελαφριά και βαριά ιόντα διερχόμενα από ελαφριά και βαριά αέρια - στόχους. Ο Bell το 1953 [8] υπολόγισε αριθμητικά, ενεργές διατομές για δέσμευση και απώλεια ηλεκτρονίων από τυπικά προϊόντα σχάσης τα οποία απογυμνώνονταν σε βαρέα και ελαφριά αέρια σε χαμηλές πυκνότητες. Σε μία αναδιατύπωση της προσέγγισης του Bohr, οι Bohr και Lindhard (1954) [20] προσπάθησαν βασισμένοι σε κλασικά και στατιστικά επιχειρήματα να δώσουν μια εκτενή ερμηνεία των μηχανισμών δέσμευσης και απώλειας ηλεκτρονίων από φορτισμένα βαρέα ιόντα. Ο Gluckstern το 1955 [21] προσάρμοσε τον τύπο του Bell έτσι ώστε να υπολογίσει ενεργές διατομές δέσμευσης και απώλειας ηλεκτρονίων από ιόντα μεσαίων ατομικών βαρών, $8 \leq Z \leq 18$, διερχόμενα μέσα από διάφορα αραιά αέρια.

Όλοι αυτοί οι επιστήμονες συνειδητοποίησαν την πολυπλοκότητα των φαινομένων ανταλλαγής φορτίου, και η θεωρητική τους προσέγγιση βασίζεται σε λογικές, από φυσικής πλευράς, αλλά αυθαίρετες υποθέσεις. Είναι αναμενόμενο ως εκ τούτου, η εφαρμογή τέτοιων θεωριών να είναι περιορισμένη και, όπως έδειξαν και πειράματα, πολλά από τα προτεινόμενα μοντέλα χρειάζονται σημαντικές τροποποιήσεις. Για παράδειγμα, όλοι οι θεωρητικοί υπολογισμοί που αναπτύχθηκαν από τους παραπάνω περιορίζονται στην δέσμευση ή την απώλεια ενός και μόνο ηλεκτρονίου. Η πιθανότητα μεταφοράς πολλών ηλεκτρονίων σε μία κρούση θεωρήθηκε ότι είναι υπαρκτή, αλλά γενικώς πολύ μικρή. Ωστόσο τα πειράματα έδειξαν ότι η δέσμευση παραπάνω του ενός ηλεκτρονίων είναι μια όχι τόσο πιθανή διαδικασία, ενώ η απώλεια πολλών ηλεκτρονίων σε μία κρούση είναι μια πολύ πιθανή διαδικασία [8]. Συνήθως η ενεργός διατομή για την αποδέσμευση πολλών ηλεκτρονίων σε μία κρούση είναι μεγαλύτερη από αυτή της αποδέσμευσης μόνο ενός. Αυτό πρέπει να συνυπολογίζεται όταν γίνεται κάποια σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών δεδομένων.

4.3 Μαθηματική περιγραφή των διαδικασιών ανταλλαγής φορτίου

4.3.1 Διαφορικές εξισώσεις υπολογισμού καταστάσεων φορτίου

Όπως αναφέρθηκε ήδη, όταν ένα ιόν με φορτίο q συγκρούεται με άτομα ή μόρια ενός μέσου, υπάρχει πιθανότητα να δεσμεύσει ή να απωλέσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια σε κάθε κρούση. Η πιθανότητα αυτών των διαδικασιών περιγράφεται από την ενεργό διατομή $\sigma(q, q')$ (cm^2/atom) ή ($\text{cm}^2/\text{molecule}$), όπου q και q' το φορτίο που έχει το ιόν πριν και μετά από μία κρούση, αντίστοιχα. Η μεταβολή της σύνθεσης του φορτίου μιας δέσμης ιόντων καθώς διέρχεται μέσα από ένα μέσο περιγράφεται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων του αριθμού των ιόντων $N_q(x)$ με φορτίο q στο σημείο x :

$$N_q(x + dx) - N_q(x) = dN_q = \sum_{q' \neq q} [\sigma(q', q)N_{q'}(x) - \sigma(q, q')N_q(x)] dx \quad (4.3)$$

όπου x , αναλόγως από τις μονάδες που επιλέγονται για το σ , είναι ο αριθμός των ατόμων/ cm^2 ή των μορίων/ cm^2 στην πορεία των ιόντων. Συνήθως βάζουμε $dx = n dz$, όπου n η πυκνότητα του υλικού σε αριθμό μορίων/ cm^3 και dz η διαφορική απόσταση που διανύει η δέσμη των ιόντων κατά την κίνηση της εντός του υλικού στην διεύθυνση \hat{z} με $\mathbf{V}_p = V_p \hat{z}$, όπου V_p η ταχύτητα της δέσμης.

Προφανώς έχουμε

$$N_0 \equiv \sum_{q'} N_{q'}(x) \quad (4.4)$$

όπου N_0 ο αρχικός αριθμός ιόντων που προσπίπτουν στο υλικό μέσο, που θα πρέπει να διατηρείται.

Αν ορίσουμε το κλάσμα $Y_q(x)$:

$$Y_q(x) \equiv \frac{N_q(x)}{N_0} \quad (4.5)$$

τότε η σχέση στην εξ. 4.3 μπορεί να γραφτεί με την κανονικοποιημένη μορφής της:

$$\frac{dY_q(x)}{dx} = \sum_{q' \neq q} [\sigma(q', q) Y_{q'}(x) - \sigma(q, q') Y_q(x)] \quad (4.6)$$

με

$$\sum_{q'} Y_{q'}(x) = 1 \quad (4.7)$$

όπου το Y_q υποδηλώνει το κανονικοποιημένο κλάσμα (βλέπε εξ. 4.7 με $Y_q < 1$), σε σχέση με το σύνολο, των ιόντων που έχουν φορτίο q . Η τιμές των q και q' μπορούν να κυμαίνονται μεταξύ $-1 \leq q \leq Z$, αν και οι πραγματικές κατανομές φορτίου παρουσιάζουν ένα περιορισμένο εύρος στις τιμές του Y_q . Αξίζει να σημειωθεί, ότι η εξ. 4.6 λαμβάνει υπόψιν μόνο εκείνες τις κρούσεις που οδηγούν σε αλλαγή του φορτίου του ιόντος, και δεν περιλαμβάνει διαδικασίες στις οποίες σημειώνεται διέγερση των ιόντων. Επίσης προϋποθέτει ότι το μέσο απογύμνωσης είναι τόσο αραιό ώστε η απώλεια ενέργειας των ιόντων της δέσμης κατά τη διέλευση τους από τον στόχο να θεωρείται αμελητέα. Τέλος, στην περίπτωση απογύμνωσης με αέριο, αύξηση του μήκους του σωλήνα απογύμνωσης σε σταθερή πίεση και αύξηση της πίεσης σε σταθερού μήκους σωλήνα θεωρούνται ισοδύναμες μεταβολές [8].

4.3.2 Ισορροπία καταστάσεων φορτίου

Κάτω από τις ιδανικές συνθήκες που περιγράφηκαν παραπάνω, κάθε κλάσμα κατάστασης φορτίου φτάνει σε μια ισορροπία (δυναμική) όταν η πυκνότητα του μέσου-στόχου αυξηθεί σε κάποια τιμή, και παραμένει αμετάβλητη ανεξάρτητα από την περαιτέρω αύξηση της πυκνότητας του στόχου. Οι τιμές αυτές των κλασμάτων επί του συνόλου των πιθανών καταστάσεων για να διαφοροποιηθούν από αυτές πριν την επίτευξη ισορροπίας συμβολίζονται με F_q αντί για Y_q . Η αντίστοιχη εξίσωση της 4.6 μετά την επίτευξη ισορροπίας για τα ποσοστά των καταστάσεων φορτίου γράφεται

$$\sum_{q' \neq q} F_{q'} \sigma(q', q) - F_q \sigma_t(q) = 0 \quad (4.8)$$

όπου το $\sigma_t(q)$ συμβολίζει την συνολική ενεργό διατομή μεταβολής του φορτίου για ιόντα με φορτίο q ,

$$\sigma_t(q) = \sum_{q' \neq q} \sigma(q, q'). \quad (4.9)$$

Η εξ. 4.8 υπαινίσσεται ότι ο αριθμός των ιόντων που μεταβαίνουν σε μια κατάσταση φορτίου με ποσοστό F_q είναι ίσος με αυτόν που την εγκαταλείπουν οπότε επιτυγχάνεται μια ισορροπία στο κλάσμα της. Το πιο απλό παράδειγμα υπολογισμών αφορά την περίπτωση ενός συστήματος αποτελούμενο μόνο από δυο καταστάσεις και περιγράφεται στην συνέχεια.

Η εξ. 4.6 σε αυτήν την περίπτωση γίνεται

$$dY_1/dx = -Y_1 \sigma_l + Y_2 \sigma_c, \quad dY_2/dx = Y_1 \sigma_l - Y_2 \sigma_c, \quad (4.10)$$

όπου οι ενεργές διατομές $\sigma_l = \sigma(1, 2)$ και $\sigma_c = \sigma(2, 1)$ είναι οι μόνες που χρειάζονται. Επιλύοντας την εξ. 4.10 χρησιμοποιώντας την αρχική συνθήκη $Y_1(0) = 1$ προκύπτει

$$Y_1(x) = F_1 [1 + (\sigma_l/\sigma_c) \exp(-\sigma_T x)], \quad Y_2(x) = F_2 [1 - \exp(-\sigma_T x)], \quad (4.11)$$

όπου $\sigma_T = \sigma_c + \sigma_l$. Στην ισορροπία ισχύει $dY(x)/dx = 0$ οπότε αντικαθιστώντας στην εξ. 4.10 και θεωρώντας $F_1 = 1 - F_2$ για τα ισορροπημένα κλάσματα προκύπτει ότι

$$F_1 = \sigma_c/\sigma_T, \quad F_2 = \sigma_l/\sigma_T. \quad (4.12)$$

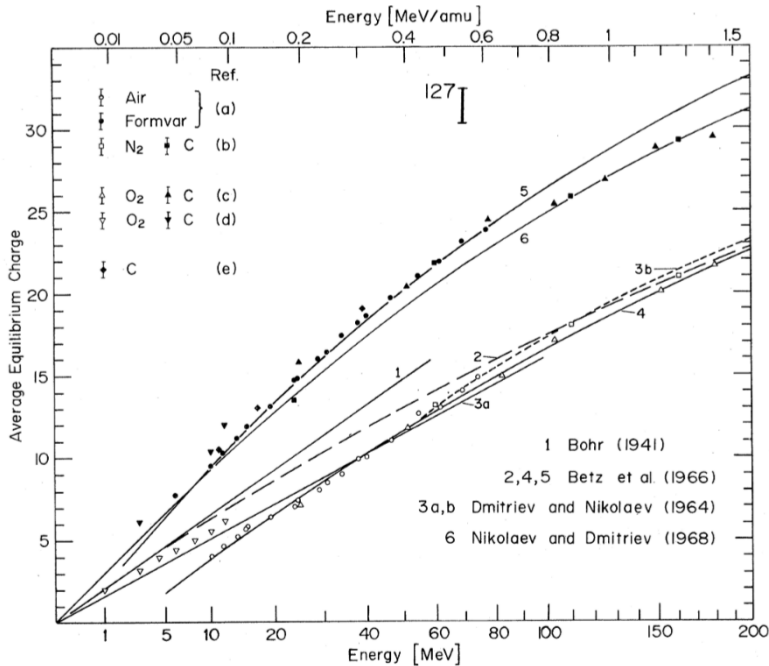
Το παράδειγμα αυτό δείχνει ότι η ισορροπία επιτυγχάνεται για $\sigma_T x \gg 1$ όπου το σ_T είναι το άθροισμα των ενεργών διατομών δέσμησης και απώλειας ενός ηλεκτρονίου, και ότι το κλάσμα στην ισορροπία της κατάστασης εξαρτάται μόνο από τον λόγο των ενεργών διατομών. Ποιοτικά αυτό το παράδειγμα δεν διαφοροποιείται στην περίπτωση συστημάτων πολλών καταστάσεων.

Μια σημαντική ποσότητα είναι η μέση τιμή των καταστάσεων φορτίου ύστερα από την επίτευξη ισορροπίας \bar{q} η οποία ορίζεται ως

$$\bar{q} = \sum q F(q) \quad (4.13)$$

οι τιμές της οποίας εν γένει δεν είναι ακέραιες. Η τιμή φορτίου που συνδέεται με το μεγαλύτερο ποσοστό παραγωγής συχνά αναφέρεται ως η πιθανότερη κατάσταση φορτίου. Μια ακόμη χαρακτηριστική παράμετρος είναι το εύρος της κατανομής των καταστάσεων το οποίο ορίζεται ως

$$d = \left[\sum (q' - \bar{q})^2 F(q') \right]^{1/2}. \quad (4.14)$$



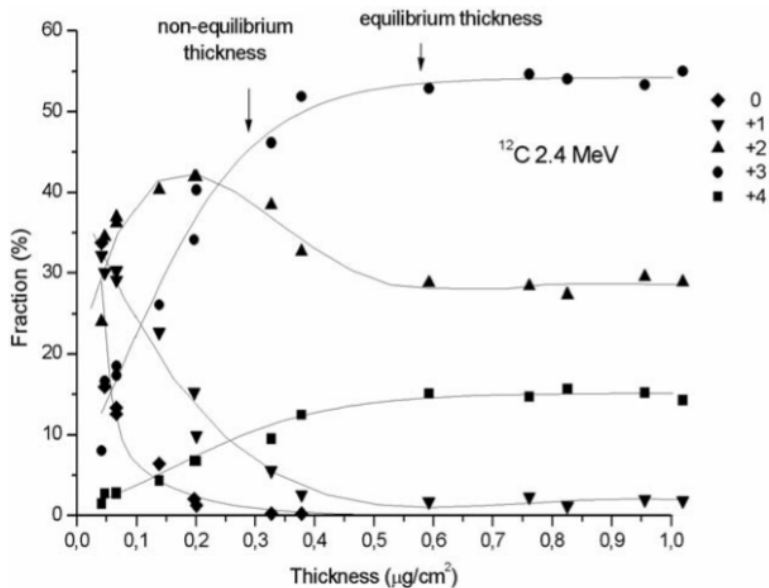
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα μέσης τιμής φορτίου ιόντων ιωδίου, κατά την διέλευση τους από αέρια άζωτο, οξυγόνο και αέρα και από υμένια άνθρακα και formvar συναρτήσει της ενέργειας απογύμνωσης [8].

4.4 Ενεργές διατομές παραγωγής καταστάσεων φορτίου

Η ενεργός διατομή $\sigma(q)$ παραγωγής μιας κατάστασης φορτίου μέσω δέσμησης ή απώλειας ηλεκτρονίων όταν ταχύα ιόντα συγκρούονται με άτομα ή μόρια στόχου, παρέχει τη θεμελιώδη πληροφορία για την ακριβή περιγραφή των καταστάσεων που παράγονται σε τέτοιου είδους κρούσεις. Ένα πλήθος ερευνητών αφιέρωσαν σημαντική προσπάθεια για τον υπολογισμό και την μέτρηση αυτών των ενεργών διατομών.

Παρόλα αυτά, ενώ παρατηρείται μια λογική συμφωνία μεταξύ θεωρίας και πειράματος στις πιο απλές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα όταν πρωτόνια κινούνται μέσα σε υδρογόνο, στην περίπτωση βαρέων ιόντων οι διαδικασίες που συμμετέχουν στην δέσμηση ή απώλεια ηλεκτρονίων είναι γενικώς τόσο περίπλοκες που δεν μπορούν να έχουν μια ακριβή και εμπειριστατωμένη περιγραφή. Το μεγαλύτερο μέρος των θεωρητικών μελετών βασίζεται σε απλοποιημένα μοντέλα και γενικώς αυθαίρετα συμπεράσματα. Ως εκ τούτου, δεν προκαλεί έκπληξη το ότι αυτά τα μοντέλα μπορούν να εξάγουν μόνο προσεγγιστικά αποτελέσματα τα οποία υπόκεινται σε περιορισμούς όσον αφορά τις παραμέτρους Z_p , V_p , q και Z_T [8].

Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκαν ημι-εμπειρικοί τύποι, οι οποίοι βασισμένοι σε προσεγγίσεις πειραματικών δεδομένων κατανομών καταστάσεων φορτίου εξάγουν ικανοποιητικά αποτελέσματα χωρίς την γνώση ενεργών διατομών παραγωγής των διαφόρων



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα μεταβολής καταστάσεων φορτίου ιόντων συναρτήσει της πυκνότητας του στόχου. Η απογύμνωση έγινε με αέριο απογυμνωτή N_2 στο τερματικό του επιταχυντή. Το αρχικό φορτίο της δέσμης ήταν $q = -1$ με ενέργεια 2.4 MeV. Παρατηρείται ότι η ισορροπία επιτυγχάνεται από μια τιμή πυκνότητας και πάνω [1].

καταστάσεων.

4.5 Ημι-εμπειρικές μέθοδοι προσδιορισμού κλασμάτων καταστάσεων φορτίου κατά την απογύμνωση ιόντων

Η θεωρητική πρόβλεψη των κλασμάτων φορτισμένων καταστάσεων που προκύπτουν ύστερα από κρούσεις ιόντων δέσμης και ατόμων-μορίων, επιτυγχάνεται σε κάποιο βαθμό μέσω ημι-εμπειρικών μαθηματικών σχέσεων οι οποίες προέκυψαν από αναγωγή πειραματικών δεδομένων σε γνωστές μαθηματικές κατανομές. Οι συγκεκριμένες σχέσεις είναι ακριβείς και δεν προϋποθέτουν την γνώση των ενεργών διατομών παραγωγής των διαφόρων καταστάσεων [19, 22, 23].

Η πρακτική αξία που έχουν αυτοί οι τύποι στον χειρισμό των επιταχυντών Tandem Van de Graaff είναι τεράστια μιας και προσδιορίζουν τα ποσοστά δημιουργίας κάθε κατάστασης φορτίου αναλόγως τον ατομικό αριθμό και την ενέργεια της δέσμης ιόντων που επιταχύνεται. Εκτός αυτού όμως, είναι επίσης απαραίτητοι για πειραματικές ομάδες ατομικής φυσικής όπως αυτής του APAPES μιας και για την παραγωγή συγκεκριμένων υψηλά φορτισμένων ιόντων, αναγκαίων για το πείραμα, προσδιορίζεται ο συνδυασμός των απογυμνωτών, τερματικού και μετα-απογυμνωτών, που πρέπει να χρησιμοποιηθούν.

Αυτοί οι ημι-εμπειρικοί τύποι κατέδειξαν αναγκαία την κατασκευή ενός συστήματος μετα-απογυμνωτών (post stripper - PS) σε σημείο όπου η δέσμη ιόντων έχει την μέγιστη ενέργεια, μιας και η δημιουργία υψηλά φορτισμένων καταστάσεων είναι πιθανότερη όταν η απογύμνωση γίνεται σε υψηλές ενέργειες. Κατά τις δεκαετίες διερεύνησης του συγκεκριμένου αντικειμένου έχουν διαμορφωθεί αρκετοί ημι-εμπειρικοί τύποι για την πρόβλεψη της πιθανότητας δημιουργίας των διαφόρων φορτισμένων καταστάσεων. Μερικοί από τους πιο δημοφιλείς περιγράφονται στην συνέχεια.

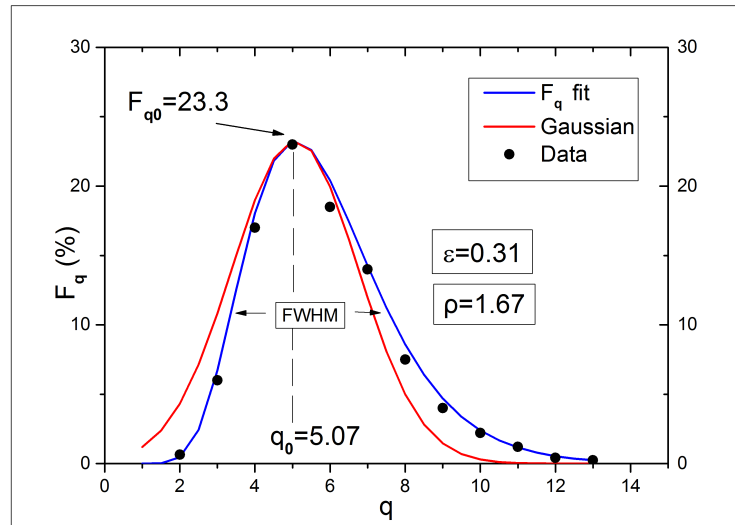
Σύμφωνα με την ημι-εμπειρική σχέση του R.O. Sayer [19] η κατανομή των πιθανοτήτων των φορτισμένων καταστάσεων μπορεί να περιγραφεί από την ασύμμετρη εξίσωση:

$$F_q = F_{q_0} \exp\left(\frac{-0.5 t^2}{1 + \varepsilon t}\right) \quad (4.15)$$

όπου

$$t = \frac{q - q_0}{\rho} \quad (4.16)$$

με F_q το κλάσμα κάθε κατάστασης φορτίου, q_0 η κατάσταση φορτίου με την μεγαλύτερη ένταση. Όταν ο παράγοντας ασυμμετρίας $\varepsilon \rightarrow 0$, η κατανομή της συνάρτησης τείνει στην κατανομή Gauss εύρους ρ , $q \rightarrow q_0$ και $\rho F_{q_0} \rightarrow 1/\sqrt{2\pi}$.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα πιθανοτήτων παραγωγής καταστάσεων φορτίου συναρτήσει της τιμής του φορτίου σύμφωνα με τον ημι-εμπειρικό τύπου του R. O. Sayer για $F_{q_0} = 23.3$, $q_0 = 5.07$, $\rho = 1.67$, $\varepsilon = 0.31$. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί σε $\varepsilon = 0$, δηλ. κατανομή Gauss [19].

Οι V.S. Nikolaev και I.S. Dmitriev [22] ανέπτυξαν και εκείνοι με την σειρά τους παρόμοιες σχέσεις βασισμένες σε πειραματικά δεδομένα για τον προσδιορισμό των κλασμάτων καταστάσεων φορτίου. Ένας ημι-εμπειρικός τύπος προσδιορισμού της μέσης

τιμής φορτίου \bar{q} παρουσιάζεται στην εξ. 4.17

$$\bar{q}/Z_p = \log(V_p Z_p^{a_1}/m)/\log(n Z_p^{a_2}) \quad (4.17)$$

Το φορτίο της κατάστασης που προκύπτει εξαρτάται από παράγοντες όπως ο ατομικός αριθμός των ιόντων της δέσμης (Z_p), την ταχύτητα της δέσμης (V_p) καθώς και τους συντελεστές a_1 , a_2 , m και n οι οποίοι έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα [22].

Πίνακας 4.1: Πειραματικές τιμές συντελεστών που χρησιμοποιούνται στις εξ. 4.17- 4.20 για αέρια και στερεό μέσο (T).

Medium	a_1	a_2	m	n	κ	d_0
H ₂	0.4	0.3	1.2	4.0	0.43	-
He	0.4	0.3	1.3	4.5	0.43	0.35
N ₂	0.4	0.3	0.9	7.0	0.45	0.32
Ar	0.4	0.3	0.9	7.0	0.45	0.32
T	0.1	0.6	1.2	5.0	0.40	0.38

το μισό εύρος μιας κατανομής Gauss με μέση τιμή \bar{q} προκύπτει για την περίπτωση αυτή από την σχέση:

$$d = d_0 [Z_p/\ln(n Z_p^{a_2})]^{1/2} = d_0 Z_p^\kappa, \quad (4.18)$$

$$\kappa = 1/2 \{1 - d \log[\ln(n Z_p^{a_2})]/(d \log Z_p)\} \quad (4.19)$$

$$= 1/2 [1 - a_2/\ln(n Z_p^{a_2})]. \quad (4.20)$$

Οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις 4.17- 4.20 έχουν προκύψει από προσέγγιση πειραματικών δεδομένων και παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 [22].

4.6 Η ανάγκη για έναν μετα-απογυμνωτή ηλεκτρονίων στην φασματοσκοπία ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης

Το γεγονός ότι το δυναμικό στο τερματικό του επιταχυντή Tandem Van de Graaff του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος” μπορεί να φτάσει μια μέγιστη τιμή 5.5 MV και ότι η δέσμη ιόντων που παράγεται στην πηγή μπορεί να έχει αποκλειστικά φορτίο $Q = -1$, θέτουν τον περιορισμό ότι η απογύμνωση της δέσμης στο τερματικό του επιταχυντή μπορεί να γίνει σε ενέργειες 0-5 MeV. Ημι-εμπειρικοί τύποι που έχουν αναπτυχθεί [2, 3], δείχνουν ότι συγκεκριμένες υψηλά φορτισμένες καταστάσεις δεν μπορούν να επιτευχθούν μέσω κρούσεων σε αυτό το εύρος ενεργειών. Αντιθέτως, πολύ υψηλότερη ενέργεια κρούσης απαιτείται για την επίτευξη τέτοιων καταστάσεων. Για αυτόν τον λόγο είναι απαραίτητο ένα δεύτερο σημείο απογύμνωσης της δέσμης σε σημείο μετά τον αναλυτή μαγνήτη, όπου η κατάλληλα φορτισμένη στάθμη της δέσμης επιλέγεται για περαιτέρω απογύμνωση [24]. Αυτό επιτεύχθη με την κατασκευή ενός συστήματος μετα-απογυμνωτών (post stripper - PS) ηλεκτρονίων.

Μια ακόμα δυνατότητα που μας δίνεται με την χρήση των μετα-απογυμνωτών ηλεκτρονίων αφορά τον προσδιορισμό του ποσοστού της κατάστασης $1s2s\ ^3S$ στη δέσμη ηλιοειδών ιόντων η οποία φυσιολογικά καταλαμβάνει ένα ποσοστό της τάξεως του 20-30%, με την υπόλοιπη δέσμη να αποτελείται από την βασική κατάσταση $1s^2$. Είναι ήδη γνωστό [25-27], ότι όταν η απογύμνωση της δέσμης γίνεται στο τερματικό του επιταχυντή με αέριο, η δέσμη που προκύπτει βρίσκεται σε ποσοστό σχεδόν 100% στην βασική κατάσταση ($1s^2$). Στην περίπτωση αυτή αφαιρώντας από ένα φάσμα το οποίο έχει προκύψει από μεικτή δέσμη ($1s^2, 1s2s\ ^3S$) (μέσω απογύμνωσης με υμένιο άνθρακα στο τερματικό) του φάσματος που αποτελείται μόνο από δέσμη στην βασική κατάσταση μετά από σωστή κανονικοποίηση, είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι ενεργές διατομές παραγωγής ηλεκτρονίων Auger μέσω του φαινομένου της σύλληψης (capture) ηλεκτρονίου μόνο για τις καταστάσεις με $1s2s\ ^3S$. Ο προσδιορισμός αυτός μπορεί να γίνει και με χρήση μετα-απογυμνωτών δέσμης καταγράφοντας φάσματα με τις δύο μεθόδους και συγκρίνοντας τα ύστερα από κατάλληλη κανονικοποίηση του ενός ως προς το άλλο. Στην περίπτωση αυτή θα έχουμε δύο μεικτές δέσμες ($1s^2, 1s2s\ ^3S$), με διαφορετικό ποσοστό βασικής ($1s^2$) και διεγερμένης ($1s2s\ ^3S$) κατάστασης.

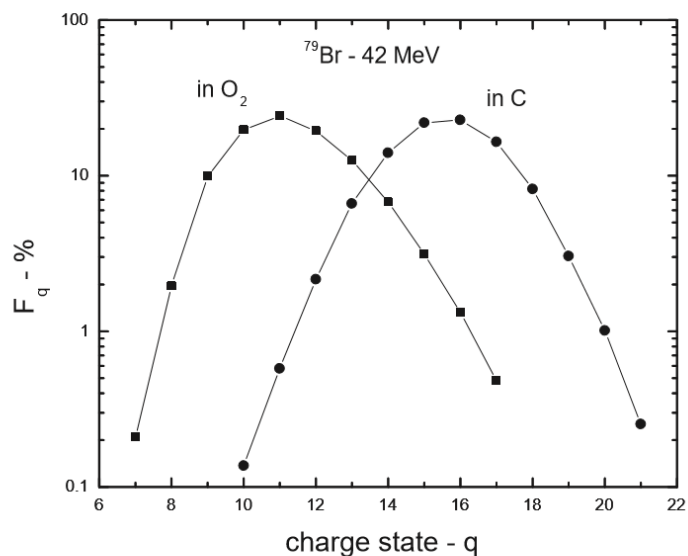
4.7 Ιδιότητες των απογυμνωτών ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης υμενίων άνθρακα και αερίου

Αρχικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με θραύσματα σχάσεων για την μελέτη της αλλαγής των φορτισμένων καταστάσεων έδειξαν μεγάλη διαφορά στην μέση τιμή του φορτίου όταν τα ιόντα διέρχονταν μέσα από αέριο ή στερεό μέσο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ξεκάθαρα ότι η μέση τιμή του φορτίου αυξάνεται όταν η απογύμνωση των ιόντων γίνεται με φύλλα άνθρακα. Η πρώτη εξήγηση αυτού του φαινομένου δόθηκε από τους Bohr και Lindhard (1954). Ανήγαγαν αυτό το φαινόμενο στην αλληλεπίδραση των διεγερμένων βλημάτων ιόντων με το μέσο - στόχο. Στην περίπτωση στερεού στόχου, εξαιτίας της πυκνότητας του οι δημιουργούμενες διεγερμένες καταστάσεις δεν προλαβαίνουν να αποδιεγερθούν πριν πραγματοποιήσουν μια διαδοχική κρούση με ένα άλλο άτομο του στόχου.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα απώλειας κάποιου ηλεκτρονίου. Μια άλλη εξήγηση αυτού του φαινομένου δόθηκε από τους Betz και Grodzins [10], οι οποίοι υποστήριζαν ότι η ισορροπία επιτυγχάνεται μετά το υμένιο άνθρακα μέσω εκπομπής ηλεκτρονίων Auger [10].

4.8 Θεωρητικοί υπολογισμοί πιθανοτήτων καταστάσεων φορτίου

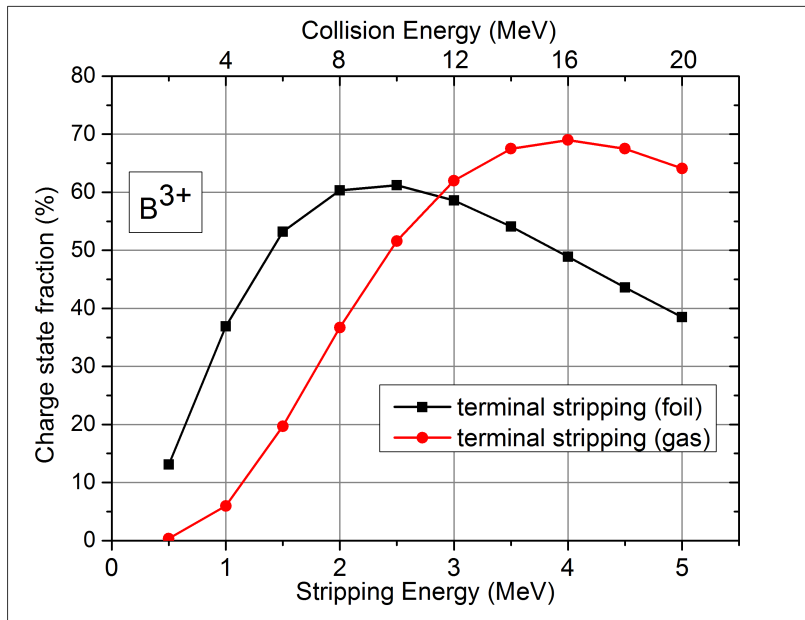
Δεδομένου ότι στα πλαίσια του APAPES χρησιμοποιούνται ηλιοειδείς δέσμες ιόντων (δηλ. μόνο με δύο ηλεκτρόνια) διαφόρων στοιχείων, έπρεπε να γίνουν αρκετοί υπολογισμοί προκαταβολικά, έτσι ώστε να προσδιορισθούν οι καταλληλότερες συνθήκες όσον αφορά τις ενέργειες και τους τρόπους απογύμνωσης για την μεγιστοποίηση του



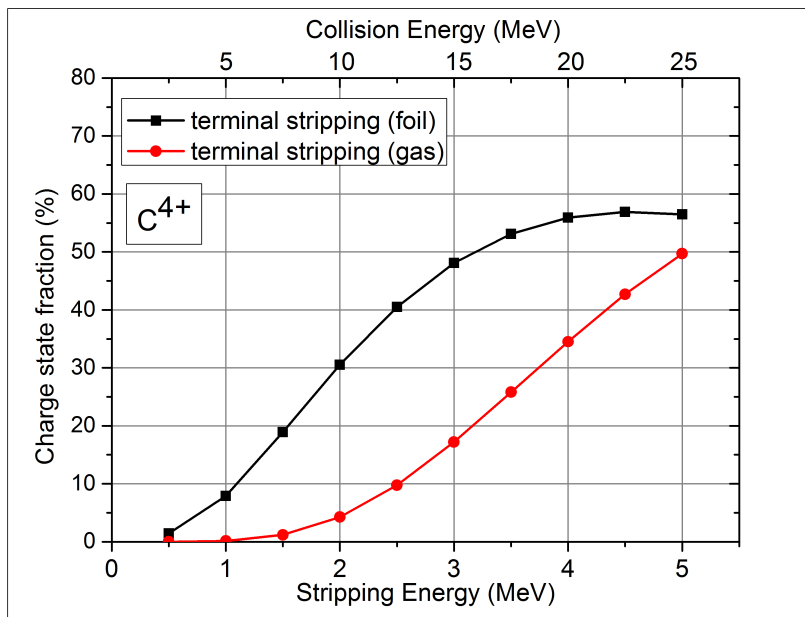
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα πιθανοτήτων καταστάσεων φορτίου ως συνάρτηση της τιμής του φορτίου της κάθε κατάστασης. Στο διάγραμμα μπορεί να παρατηρηθεί η εξάρτηση της κατανομής πιθανοτήτων από το μέσο με το οποίο γίνεται η απογύμνωση της δέσμης ^{79}Br (αέριο οξυγόνο ή υμένιο άνθρακα) [10].

ρεύματος της λαμβανόμενης δέσμης ιόντων. Τα παρακάτω διαγράμματα έχουν προκύψει μέσω του προγράμματος TARDIS (**T**ransmitted **chARGE** **DI**stribution) το οποίο δημιουργήθηκε από την κα. Μυρτώ Ασημακοπούλου [28] και χρησιμοποιεί τους ημιεμπειρικούς τύπους των R.O. Sayer, I.S. Dmitriev, V.S. Nikolaev και H.D. Betz για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων δημιουργίας των διαφορετικών καταστάσεων φορτίου μέσω της κρούσης ενός ιόντος με ένα στερεό ή αέριο μέσο, συναρτήσει του ατομικού αριθμού του ιόντος, της ενέργειας του και του φορτίου του.

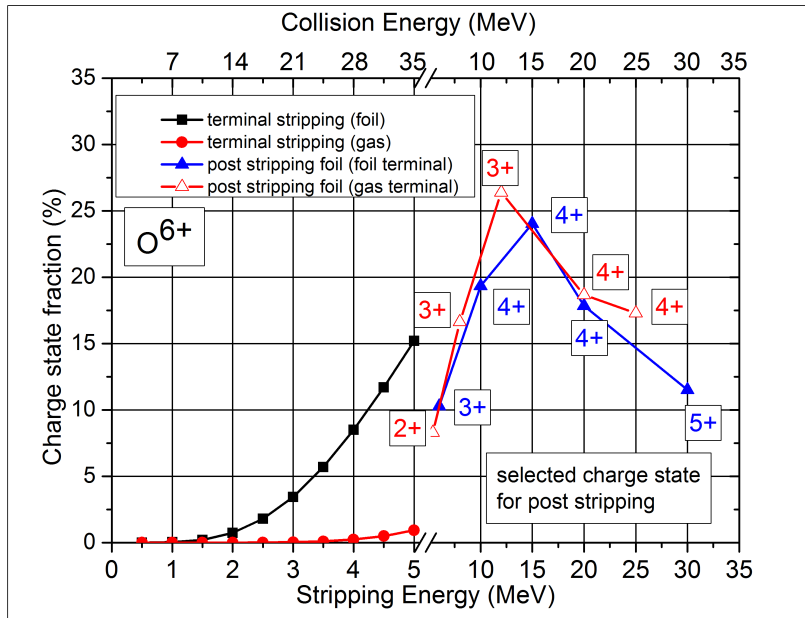
Τα σχ. 4.7 και 4.8 δείχνουν την αναγκαιότητα ύπαρξης μετα-απογυμνωτών δέσμης σε ένα εργαστήριο επιταχυντή tandem. Χαρακτηριστικό είναι ότι κάποιες υψηλά φορτισμένες καταστάσεις δεν μπορούν να δημιουργηθούν σε ικανοποιητικά ποσοστά για την πραγματοποίηση πειράματος χωρίς την χρήση μετα-απογυμνωτών. Αναλυτικοί πίνακες με τις πιθανότητες δημιουργίας ηλιοειδών καταστάσεων φορτίου με τους διάφορους τρόπους απογύμνωσης παρουσιάζονται στο παράρτημα Α.1.



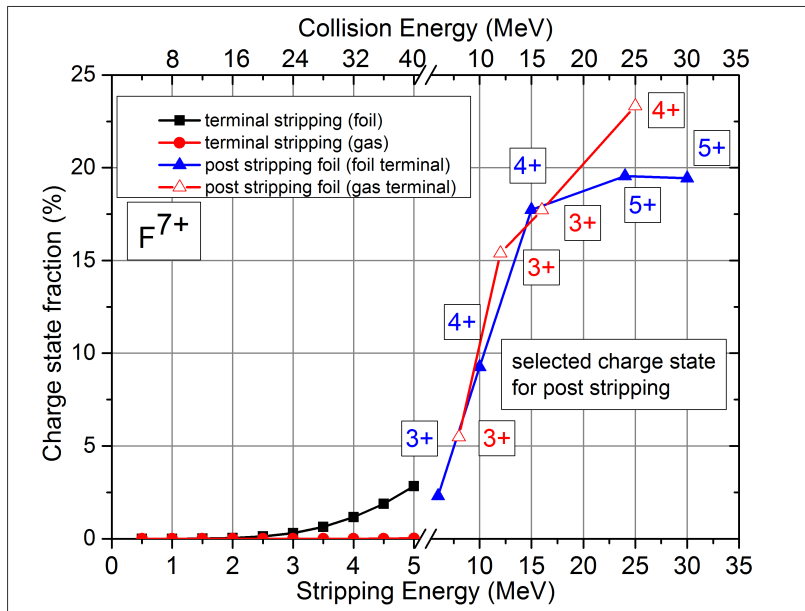
Σχήμα 4.5: Διαγράμματα πιθανότητας παραγωγής των καταστάσεων φορτίου B³⁺ συναρτήσει της ενέργειας κρούσης - απογύμνωσης στο τερματικό του επιταχυντή (terminal stripping), καθώς και η ενέργεια που αποκτά τελικά η δέση ιόντων σύμφωνα με τους τύπους του R. O. Sayer [19]. Το διάγραμμα προέκυψε με την χρήση του λογισμικού TARDIS [28].



Σχήμα 4.6: Παρόμοιο με το σχ. 4.5 αλλά για C⁴⁺.



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα πιθανότητας παραγωγής των καταστάσεων φορτίου O^{6+} συναρτήσει της ενέργειας κρούσης - απογύμνωσης είτε στο τερματικό του επιταχυντή (terminal stripping), είτε σε μετέπειτα σημείο (post-stripping) με χρήση υμενίου άνθρακα ή αερίου N_2 σύμφωνα με τους τύπους του R. O. Sayer [19]. Το διάγραμμα προέκυψε με την χρήση του λογισμικού TARDIS [28].



Σχήμα 4.8: Παρόμοιο με το σχ. 4.7 αλλά για F^{7+} .

Κεφάλαιο 5

Απογυμνωτές ιόντων δέσμης και πειραματικά αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

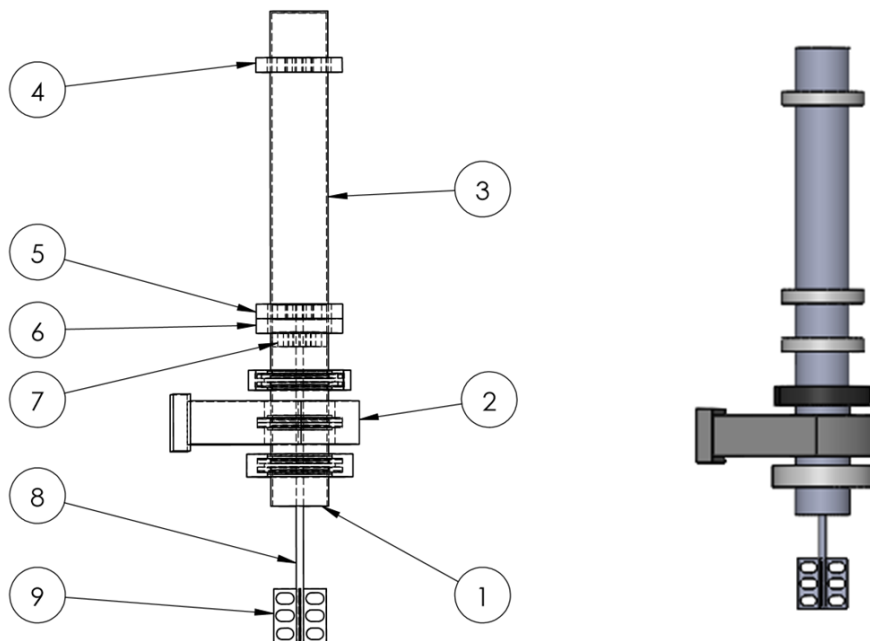
Στο παρακάτω κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή των τμημάτων που απαρτίζουν τους μετα-απογυμνωτές ιόντων (υμενίου και αερίου) καθώς επίσης και των τεχνικών προβλημάτων που έπρεπε να αντιμετωπιστούν για την ομαλή λειτουργία τους. Στην συνέχεια παρατίθενται πειραματικά αποτελέσματα φασματοσκοπίας ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης με την χρήση των μετα-απογυμνωτών για την παραγωγή των συγκεκριμένων ιόντων.

5.2 Ο απογυμνωτής ηλεκτρονίων υμενίων άνθρακα ιόντων δέσμης.

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται ο απογυμνωτής ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης λεπτών υμενίων άνθρακα. Τα βασικά μέρη που τον απαρτίζουν είναι μια ράβδος στο ένα άκρο της οποίας υπάρχει μια κατάλληλη βάση για την στήριξη των υμενίων άνθρακα, ένα σύστημα που αποτελείται από ένα ανοξείδωτο σωλήνα και έναν μηχανισμό για την μετακίνηση των υμενίων άνθρακα εντός του κενού στην κατάλληλη θέση για απογύμνωση της δέσμης. Ο συγκεκριμένος έχει την δυνατότητα να φέρει μέχρι 12 βάσεις. Στην μια από αυτές τις βάσεις είναι τοποθετημένος ένας κρύσταλλος χαλαζία ο οποίος χρησιμοποιείται για ευθυγράμμιση. Όταν η δέσμη ιόντων διέρχεται μέσα από τον κρύσταλλο εκπέμπεται χαρακτηριστικό φως. Ο συγκεκριμένος απογυμνωτής είναι δωρεά του Kansas State University στο ερευνητικό πρόγραμμα APAPES και τα σχέδια προσφέρθηκαν από την κα. Μυρτώ Ασημακοπούλου. Αναλυτικά διακρίνονται:

- ① Η είσοδος του 6-πλου σταυρού πάνω στο οποίο συνδέεται ο απογυμνωτής.
- ② Μια βάνα απομόνωσης η οποία καθιστά δυνατή την αντικατάσταση των υμενίων άνθρακα χωρίς την μεταβολή της πίεσης στο εσωτερικό της γραμμής.

- ③ Ο ανοξείδωτος σωλήνας μέσα στον οποίο φυλάσσεται ο απογυμνωτής όταν δεν χρησιμοποιείται.
- ④, ⑤, ⑥, ⑦ Ένα ειδικό σύστημα μετακίνησης του απογυμνωτή εντός και εκτός της πορείας της δέσμης.
- ⑧ Η μεταλλική ράβδος με την οποία συνδέονται οι βάσεις των υμενίων άνθρακα.
- ⑨ Οι βάσεις για δώδεκα υμένια άνθρακα.

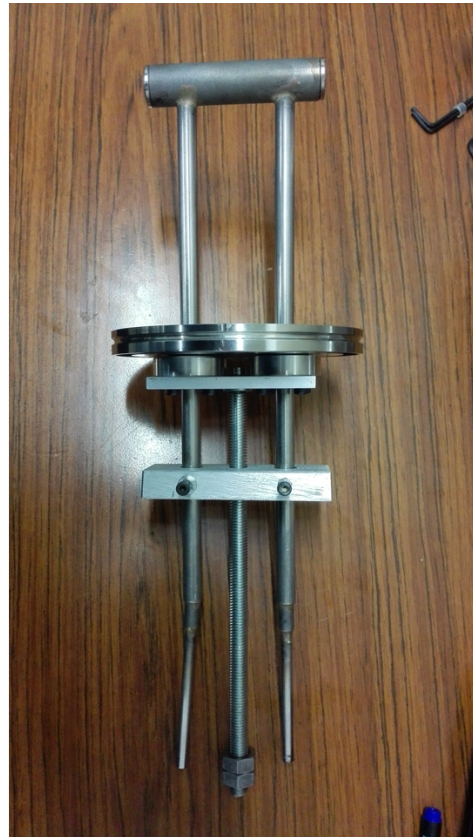
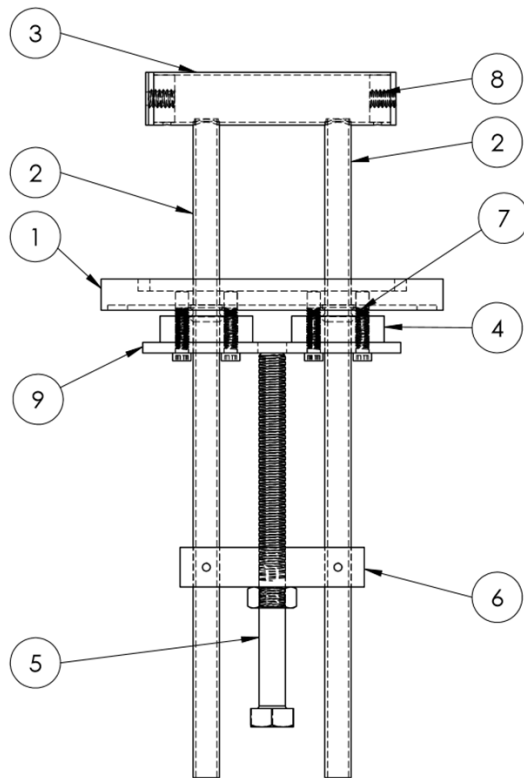


Σχήμα 5.1: Ο απογυμνωτής ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης υμενίων άνθρακα.

5.3 Ο απογυμνωτής ηλεκτρονίων αερίου ιόντων δέσμης.

Στα σχήματα 5.2 και 5.6 φαίνεται το μηχανολογικό σχέδιο του απογυμνωτή ηλεκτρονίων αερίου ιόντων δέσμης και ο ίδιος ο απογυμνωτής. Αναλυτικά διακρίνονται:

- ① Η φλάντζα (ISO-K 100) του όλου συστήματος του απογυμνωτή.
- ② Οι δύο σωλήνες εισαγωγής του αερίου και μέτρησης της πίεσης στο εσωτερικό του σωλήνα μέσα από τον οποίο διέρχεται η δέσμη.
- ③ Ο σωλήνας μέσα από τον οποίο διέρχεται η δέσμη και υφίσταται την απογύμνωση.



Σχήμα 5.2: Ο απογυμνωτής ηλεκτρονίων αερίου ιόντων δέσμης.

- ④ Δύο μικρές φλάντζες οι οποίες σε συνδυασμό με o-ring επιτρέπουν την μετακίνηση του σωλήνα απογύμνωσης χωρίς να εισέρχεται αέρας στο σύστημα.
- ⑤, ⑥, ⑨ Ένα σύστημα για την μετακίνηση του σωλήνα απογύμνωσης εντός η εκτός της πορείας της δέσμης.
- ⑦ O-Ring
- ⑧ Τάπες του σωλήνα απογύμνωσης με ένα εσωτερικό άνοιγμα 7 mm οι οποίες είναι αποσπώμενες και σκοπό έχουν τον περιορισμό του αερίου εντός του σωλήνα και ταυτόχρονα την διάδοση του μεγαλύτερου ποσού της δέσμης.

Ολοκληρωμένα τα σχέδια υπάρχουν στο παράρτημα Β'.2 της παρούσας εργασίας. Για τη σχεδίαση του απογυμνωτή μελετήθηκαν σχέδια από άλλα ήδη υπάρχοντα συστήματα απογυμνωτών αερίου και κατασκευάστηκε στο μηχανουργείο του εργαστηρίου της TANDEM από το προσωπικό του μηχανουργείου.

5.4 Μελέτη των τεχνικών δυσκολιών εγκατάστασης και ομαλής λειτουργίας ενός αέριου απογυμνωτή ηλεκτρονίων.

Κατά τη μελέτη και τη σχεδίαση του αέριου απογυμνωτή ηλεκτρονίων έγινε αντιληπτό ότι παρουσιάζονταν μία σειρά από τεχνικά προβλήματα τα οποία έπρεπε να αντιμετωπιστούν πριν γίνει η εγκατάσταση του απογυμνωτή.

Ένα αρχικό πρόβλημα που έπρεπε να επιλυθεί ήταν η διασφάλιση της ευθυγράμμισης του σωλήνα απογύμνωσης με τη δέσμη ιόντων, κατά την επανατοποθέτησή του στην πορεία της δέσμης ύστερα από μετακίνηση του εκτός της θέσης αυτής. Δεδομένου ότι απαγορεύεται λόγω κανονισμών ακτινοπροστασίας να βρίσκεται κάποιος εντός του δωματίου του επιταχυντή κατά την στιγμή που διέρχεται δέσμη εντός του επιταχυντικού σωλήνα για να μετακινήσει τον απογυμνωτή, έπρεπε να κατασκευασθεί ένα σύστημα το οποίο να διασφαλίζει την ευθυγράμμιση εκ των προτέρων. Αυτό επιτεύχθη με την προσθήκη ενός συστήματος που φαίνεται στο σχ. 5.2.

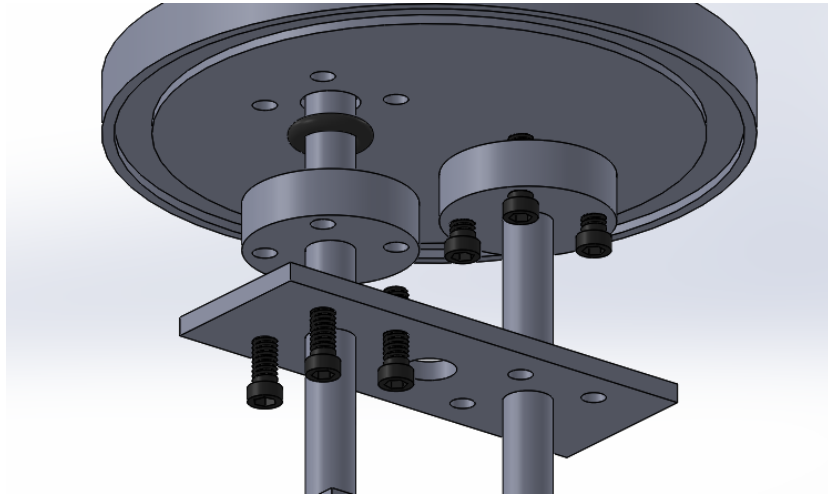
Το ⑥ είναι ένα μέταλλο το οποίο συνδέεται με τους δύο σωλήνες εισαγωγής και μέτρησης της πίεσης του αερίου ② και παράλληλα συνδέεται με σπείρωμα με μία βίδα. Η βίδα αυτή συνδέεται σταθερά με ένα μεταλλικό κομμάτι ⑨ το οποίο είναι βιδωμένο πάνω στην φλάντζα ①. Ως εκ τούτου βιδώνοντας ή ξεβιδώνοντας την βίδα μετακινείται ο σωλήνας απογύμνωσης ③ προς τα κάτω ή προς τα πάνω. Καθορίζοντας το ⑥ έτσι ώστε να εμποδίζει τον σωλήνα απογύμνωσης ③ να κινηθεί άλλο προς τα πάνω όταν έχει φτάσει σε σημείο απόλυτης ευθυγράμμισης με την δέσμη διασφαλίζουμε την ευθυγράμμιση κάθε φορά που μετακινείται ο σωλήνας απογύμνωσης ③.

Δύο ακόμη προβλήματα που έπρεπε να επιλυθούν σχετίζονταν με την διατήρηση του υψηλού κενού εντός του επιταχυντικού σωλήνα ($\sim 10^{-6}$ Torr) α) κατά την μετακίνηση του απογυμνωτή εντός ή εκτός της πορείας της δέσμης και β) κατά την λειτουργία του απογυμνωτή, όπου παρέχονται πιέσεις αερίου από 1-70 mTorr.

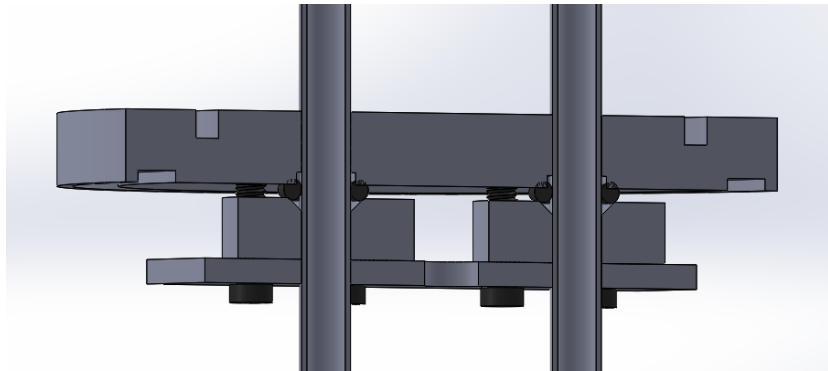
Το πρώτο πρόβλημα επιλύθηκε ύστερα από μελέτη εγχειριδίων πάνω στην τεχνολογία κενού [29]. Όπως φαίνεται και στα σχ. 5.3 και 5.4, ένα σύστημα αποτελούμενο από o-ring και σταθεροποιητικούς μεταλλικούς δακτυλίους χρησιμοποιήθηκε για την αποφυγή διαρροών αέρα στο εσωτερικό του επιταχυντικού σωλήνα.

Το δεύτερο πρόβλημα επιλύθηκε μέσω γνώσεων πάνω στην διαφορική άντληση χώρου. Για να επιτύχουμε τον περιορισμό του αερίου που χρησιμοποιείται για την απογύμνωση στον μετα-απογυμνωτή, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα από δυο μετακινούμενα μεταλλικά ελάσματα τα οποία λειτουργούν περιοριστικά ως προς την διάχυση του απογυμνωτικού αερίου ενώ ταυτόχρονα έχουν τρύπες από τις οποίες διέρχεται η δέσμη ιόντων χωρίς απώλειες. Το σύστημα αυτό φαίνεται στο σχ. 5.5.

Στο σχ. 5.7 παρουσιάζεται η εξάρτηση της πίεσης σε δύο διαφορετικά σημεία του επιταχυντικού σωλήνα, σε αποστάσεις ~ 2 m και ~ 10 m από το μετα-απογυμνωτή αερίου, από την πίεση του αερίου εντός του απογυμνωτή. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η σχέση μεταξύ της πίεσης του αερίου στον απογυμνωτή και των τιμών πίεσης σε κάθε ένα από τα δύο σημεία είναι γραμμική. Η βέλτιστη τιμή πίεσης στον απογυμνωτή που επι-

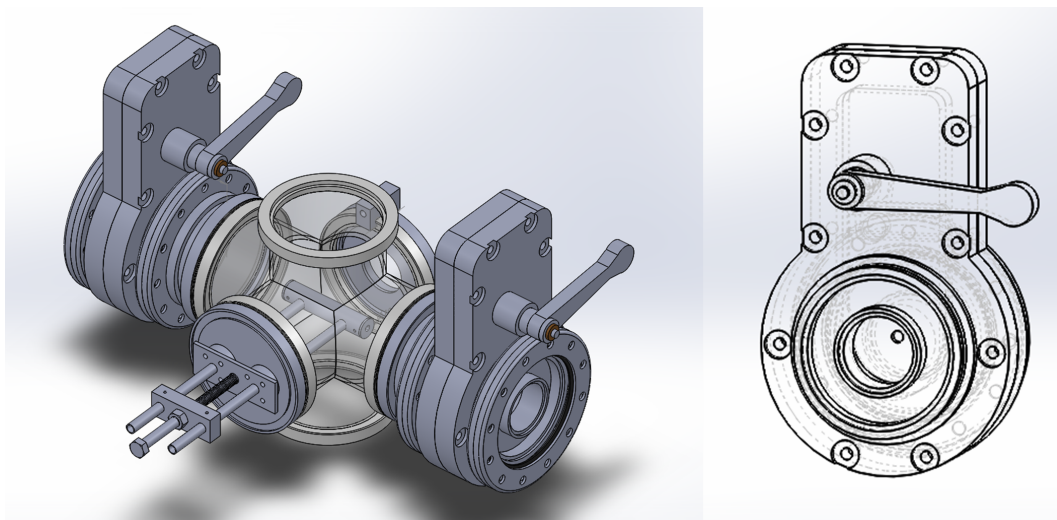


Σχήμα 5.3: Το σταθεροποιητικό σύστημα διατήρησης του κενού κατά την μετακίνηση του αέριου απογυμνωτή.

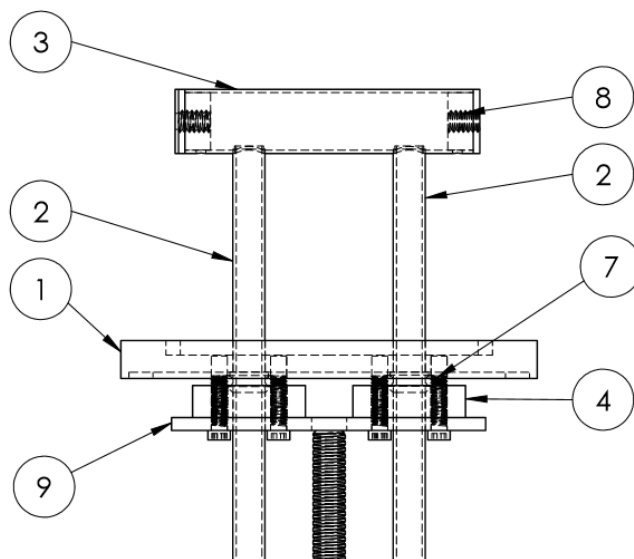


Σχήμα 5.4: Το σταθεροποιητικό σύστημα διατήρησης του κενού κατά την μετακίνηση του αέριου απογυμνωτή.

λέγεται είναι αυτή κατά την οποία εξάγεται ικανοποιητικό ρεύμα ιόντων και ταυτόχρονα διατηρείται η πίεση στον επιταχυντικό σωλήνα σε χαμηλές τιμές ($\sim 10^{-6}$ Torr).



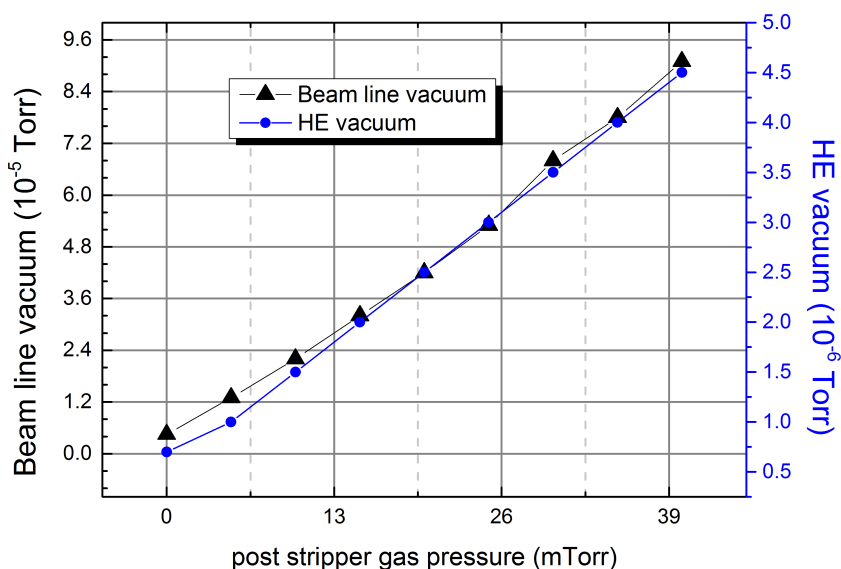
Σχήμα 5.5: Το σύστημα περιορισμού του αερίου απογυμνωτικού μέσου.



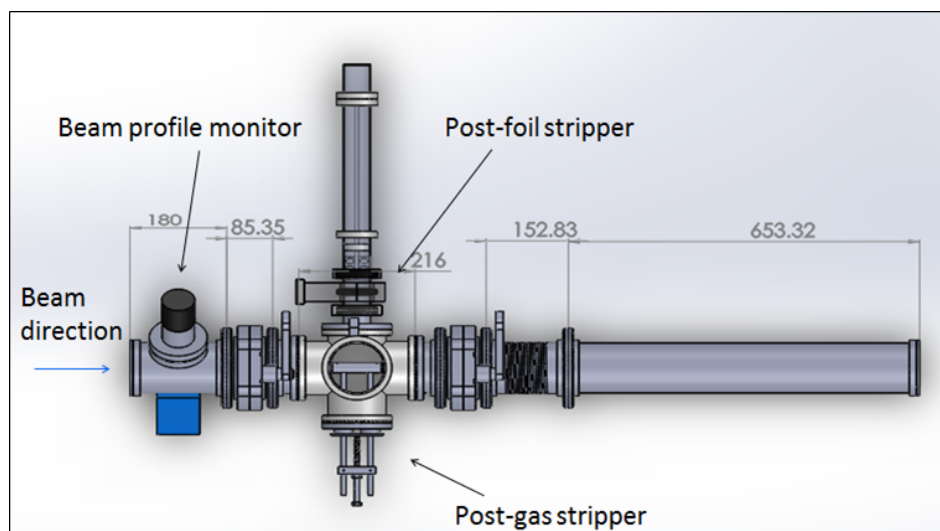
Σχήμα 5.6: Κοντινή εικόνα του μηχανολογικού σχεδίου του αερίου απογυμνωτή ηλεκτρονίων.

5.5 Πειραματικά αποτελέσματα φασματοσκοπίας ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης με χρήση μετα-απογυμνωτών ιόντων δέσμης.

Κατά την περίοδο 2 - 7 Νοεμβρίου 2015 πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά πείραμα με χρήση μετα-απογυμνωτών ιόντων δέσμης στο εργαστήριο της TANDEM. Η επιθυμητή δέσμη ιόντων C^{4+} προέκυψε μέσω δύο σταδίων απογύμνωσης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής: Η αρχική δέσμη C^{1-} προερχόμενη από την πηγή ιόντων

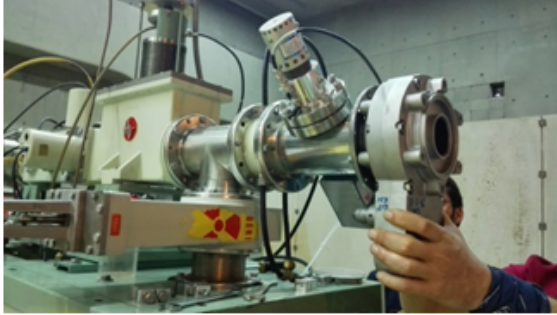
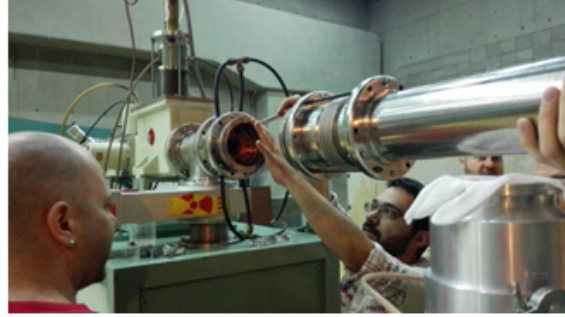


Σχήμα 5.7: Διάγραμμα πίεσης στην γραμμή του επιταχυντή συναρτήσει της πίεσης του αερίου στον μετα-απογυμνωτή. Οι μετρήσεις πίεσης για την ποιότητα του κενού πάρθηκαν με μετρητές σε κοντινή απόσταση από τον μετα-απογυμνωτή, μαύρη γραμμή (~2 m), και στην έξοδο της tandem, μπλε γραμμή (~10 m). Παρατηρείται ότι η σχέση των πιέσεων είναι γραμμική και στα δύο σημεία.

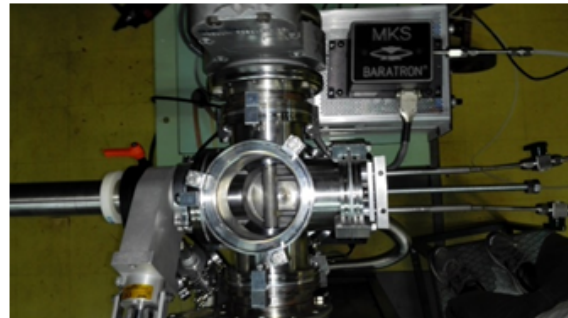
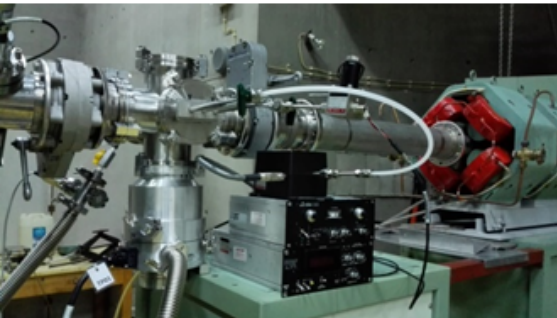


Σχήμα 5.8: Το σύστημα των απογυμνωτών ηλεκτρονίων.

αλληλεπιδρά με φύλλο άνθρακα στο τερματικό του επιταχυντή και λόγω ανταλλαγής φορτίων προκύπτουν ιόντα άνθρακα με τιμές φορτίου 0 έως 6+. Στην συνέχεια το σύνολο αυτών των καταστάσεων φορτίου διέρχεται μέσα από τον μαγνήτη ανάλυσης. Ο



Σχήμα 5.9: Εργασίες εγκατάστασης των απογυμνωτών ηλεκτρονίων.

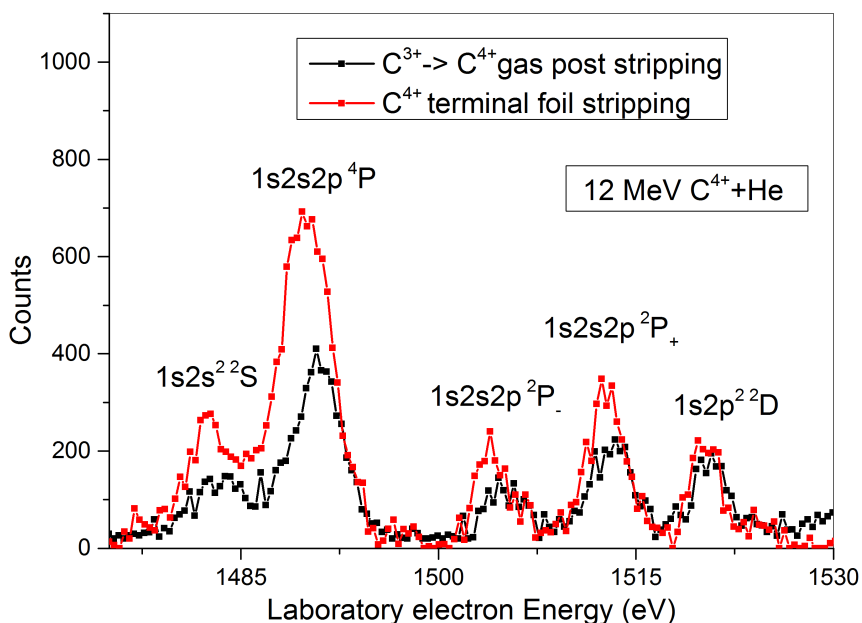


Σχήμα 5.10: Η ολοκληρωμένη εγκατάσταση των απογυμνωτών ηλεκτρονίων.

μαγνήτης ανάλυσης έχει ρυθμιστεί στην κατάλληλη τιμή μαγνητικού πεδίου έτσι ώστε μόνο η δέσμη ιόντων C^{3+} να διαγράψει την κατάλληλη τροχιά στρίβοντας κατά 90^0 και να συνεχίσει την πορεία της. Στην συνέχεια φτάνοντας τον μετα-απογυμνωτή η δέσμη διέρχεται είτε μέσα από δεύτερο φύλλο άνθρακα είτε μέσα από αέριο N_2 και λόγω μιας δεύτερης ανταλλαγής φορτίου μεταξύ της δέσμης και μέσου προκύπτουν εκ νέου καταστάσεις φορτίου με φορτία 0 έως $6+$. Στην συνέχεια με χρήση του επιλογέα μαγνήτη επιλέγεται η κατάσταση C^{4+} η οποία κατευθύνεται προς τον στόχο της πειραματικής γραμμής.

5.5.1 Φάσματα ηλεκτρονίων Auger $C^{4+} + He$

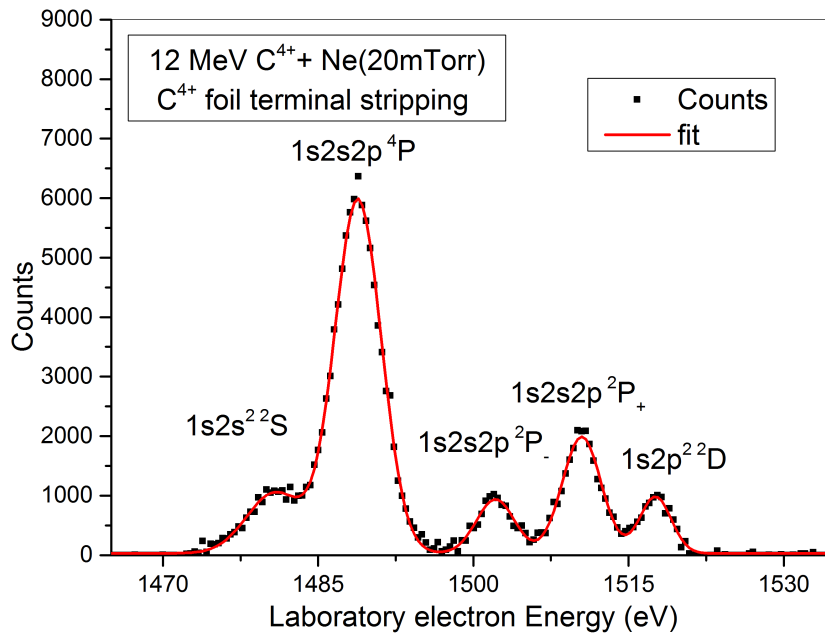
Στο σχ. 5.11 παρουσιάζονται δύο φάσματα ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης 12 MeV C^{4+} μετά από κρούση με αέριο He. Το φάσμα σε κόκκινο έχει προκύψει από δέσμη ιόντων C^{4+} η οποία δημιουργήθηκε με απογύμνωση με υμένιο άνθρακα στο τερματικό του επιταχυντή, ενώ το φάσμα σε μαύρο έχει προκύψει από δέσμη ιόντων C^{4+} η οποία δημιουργήθηκε μέσω δυο σταδίων απογύμνωσης. Ένα αρχικό με υμένιο άνθρακα στο τερματικό του επιταχυντή, από το οποίο επιλέχθηκε η δέσμη C^{3+} για επόμενη απογύμνωση με αέριο N_2 για την δημιουργία της τελικής δέσμης C^{4+} .



Σχήμα 5.11: Φάσμα ηλεκτρονίων Auger 12 MeV $C^{4+} + He$. Η δημιουργία της κατάστασης C^{4+} έγινε με χρήση απογυμνωτή υμενίων άνθρακα (carbon foils) στο τερματικό του επιταχυντή (κόκκινη γραμμή) και σε δύο στάδια με απογυμνωτή υμενίου άνθρακα (carbon foil) στο τερματικό του επιταχυντή και απογυμνωτή αερίου N_2 στον μετα-απογυμνωτή (μαύρη γραμμή).

5.5.2 Φάσματα ηλεκτρονίων Auger $C^{4+} + Ne$

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ως στόχο αυτή τη φορά Ne. Το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι ο προσδιορισμός του κλάσματος της μετασταθούς κατάστασης $1s2s\ ^3S$ από το σύνολο των καταστάσεων $1s^2, 1s2s\ ^3S$ που αποτελούν την δέσμη C^{4+} .

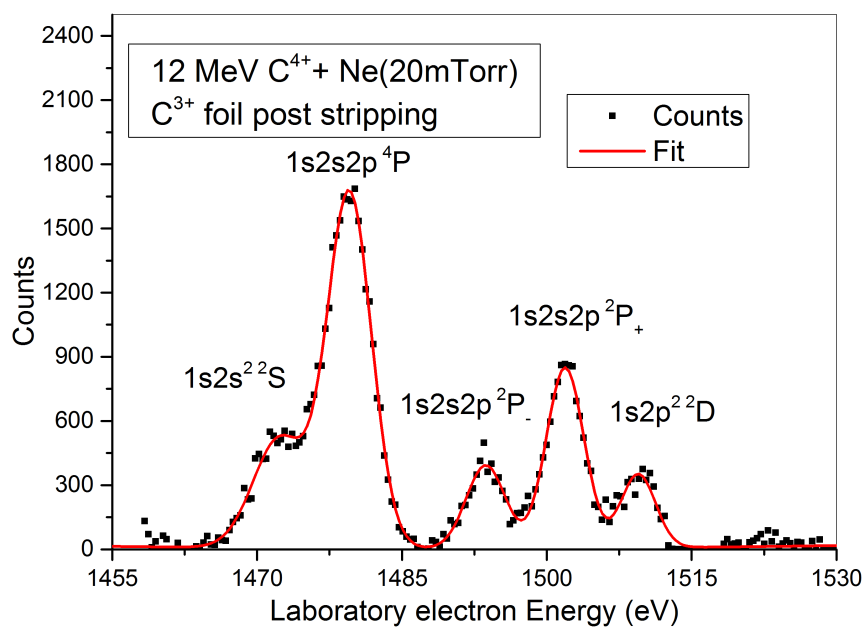


Σχήμα 5.12: Φάσμα ηλεκτρονίων Auger 12 MeV C^{4+} + Ne. Η δημιουργία της κατάστασης C^{4+} έγινε με χρήση απογυμνωτή υμενίου άνθρακα (carbon foil) στο τερματικό του επιταχυντή.

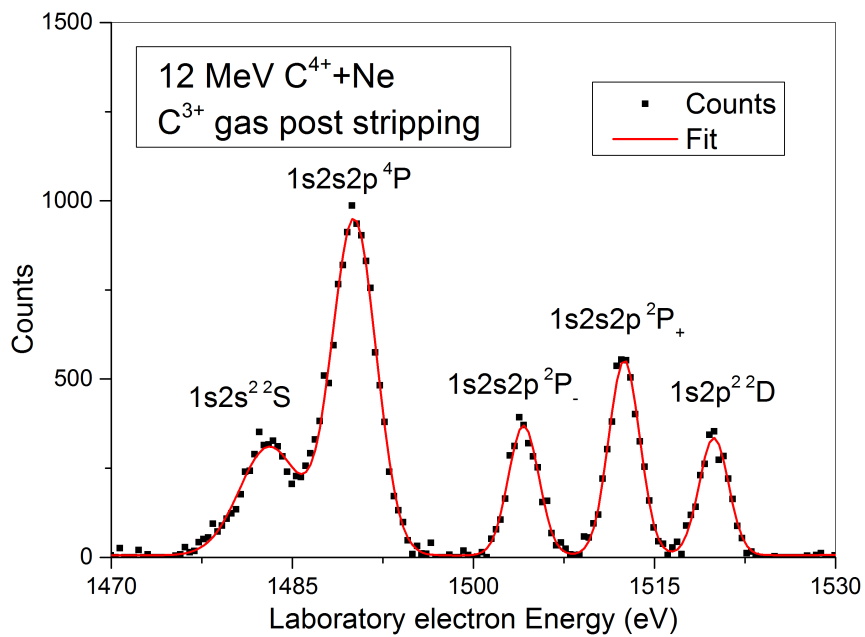
5.6 Συμπεράσματα- Προοπτικές

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, το εργαστήριο του επιταχυντή του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε “Δημόκριτος” απέκτησε ένα σύστημα μετα- απογυμνωτών ιόντων δέσμης. Η προσθήκη αυτή στο ήδη υπάρχον σύστημα δίνει την δυνατότητα παραγωγής υψηλά φορτισμένων ιόντων αδύνατον να παραχθούν μέχρι τώρα. Το σύστημα αυτό αναμένεται να χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την παραγωγή υψηλά φορτισμένων ιόντων και για φασματοσκοπία ηλεκτρονίων ιόντων δέσμης από την πειραματική ομάδα του APAPES.

Μελλοντικά θα είναι στην διάθεση όλων των πειραματικών ομάδων που πραγματοποιούν πειράματα στο εργαστήριο του επιταχυντή. Μία άλλη δυνατότητα που δίνει αυτό το σύστημα μετά- απογυμνωτών είναι στο κομμάτι της έρευνας των ενεργών διατομών παραγωγής καταστάσεων φορτίου όταν ταχέως κινούμενα ιόντα διέρχονται μέσα από αέριο ή στερεό μέσο. Στις μέρες μας, υπάρχουν πειραματικές ομάδες που ασχολούνται αποκλειστικά με αυτόν τον τομέα. Στο μέλλον αναμένεται οι πίνακες με τις θεωρητικές τιμές κλασμάτων καταστάσεων φορτίου να συμπληρωθούν με μετρήσεις ρεύματος ιόντων έτσι ώστε να αποτελούν έναν πρακτικό οδηγό για τον χειριστή του επιταχυντή και για τους πειραματιστές.



Σχήμα 5.13: Φάσμα ηλεκτρονίων Auger 12 MeV C^{4+} + Ne. Η δημιουργία της κατάστασης C^{4+} έγινε με χρήση απογυμνωτή υμενίου άνθρακα (carbon foil) στο τερματικό του επιταχυντή και με χρήση απογυμνωτή υμενίου άνθρακα στον μετα-απογυμνωτή.



Σχήμα 5.14: Φάσμα ηλεκτρονίων Auger 12 MeV $C^{4+} + Ne$. Η δημιουργία της κατάστασης C^{4+} έγινε με χρήση απογυμνωτή υμενίου άνθρακα (carbon foil) στο τερματικό του επιταχυντή και με χρήση απογυμνωτή αερίου στον μετα-απογυμνωτή.

Ευχαριστίες

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος “Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση” του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς - ΕΣΠΑ Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: ΘΑΛΗΣ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου κωδικός προγράμματος MIS 377289.

Βιβλιογραφία

- [1] R. Hellborg, *Electrostatic Accelerators: Fundamentals and Applications* (Springer, New York, 2005).
- [2] H. D. Betz, G. Horting, E. Leischner, Ch. Schmelzer, B. Standler, J. Weihrauch, *Phys. Lett.* **22**, 643 (1966).
- [3] H. D. Betz, in *Atomic Physics Accelerators, of Methods in Experimental Physics*, edited by Patrick Richard (Academic Press, United States, 1980), Vol. **17**, pp. 73 – 148.
- [4] T. J. M. Zouros, B. Sulik, L. Gulyas, K. Tokesi, *Phys. Rev. A* **77**, 050701 (2008).
- [5] <https://www.solidworks.com/>, Solidworks, (2015).
- [6] A. Itoh and N. Stolterfoht, *Nucl. Instrum. & Meth. in Phys. Res. B* **10**, 97 (1985).
- [7] <http://vlab.amrita.edu/?sub=1&brch=192&sim=349&cnt=1>, Amrita Vishwa Vidyapeetham University, (2015).
- [8] H. D. Betz, *Reviews of Modern Physics* **44**, 465 (1972).
- [9] S. Peng, K. Liu, Z. Guo, H. Ma, J. Yuan, A new gas stripper design for PKUAMS, 2nd Asian Particle Accelerator Conference, (2001).
- [10] C. J. Schmitt, Ph.D. Dissertation, *Equilibrium charge state distributions of low-Z ions incident on thin self-supporting foils*, University of Notre Dame, Indiana, (2010).
- [11] T. J. M. Zouros, in *Recombination of Atomic Ions*, NATO Advanced Study Institute Series B: Physics, edited by W. G. Graham, W. Fritsch, Y. Hahn and J. Tanis (Plenum, New York, 1992), Vol. **296**, pp. 271–300.
- [12] T. J. M. Zouros and D. H. Lee, in *Accelerator-based atomic physics techniques and applications*, edited by S. M. Shafroth and J. C. Austin (AIP, Woodbury, NY, 1997), Chap. 13, pp. 426–479.
- [13] <http://www.mksinst.com/index.aspx>, MKS Instruments.

- [14] M. Dogan, M. Ulu, G. G. Gennarakis and T. J. M. Zouros, *Review of Scientific Instruments* **84**, 043105, (2013).
- [15] E. P. Benis, Ph.D. Dissertation, *A novel high-efficiency paracentric hemispherical spectrograph for zero degree Auger projectile spectroscopy*, Dept. of Physics, University of Crete, 2001, (unpublished).
- [16] T. J. M. Zouros, E. P. Benis, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 094105 (2005).
- [17] Εμμ. Δρής, Σ. Μαλτέζος, *Οργανολογία Σημειώσεις* (Ε. Μ. Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004).
- [18] M. Imai, M. Sataka, M. Matsuda, S. Okayasu, K. Kawatsura, K. Takahiro, K. I. Komaki, H. Shibata, K. Nishio, Selected contributed lecture ISIAC (2015).
- [19] R. O. Sayer, *Rev. Phys. Appl.* **12**, 1543 (1977).
- [20] N. Bohr, J. Lindhard, *Fys. Medd. Dan. Vidensk. Selsk.* **28**, no. 7, (1954).
- [21] R. L. Gluckstern, *Phys. Rev.* **98**, 1817 (1955).
- [22] I. S. Dmitriev, V. S. Nikolaev, *Sov. Phys. J. Exp. Theor. Phys. (U.S.S.R)* **20**, 409 (1965).
- [23] K. Shima, T. Ishihara and T. Mikumo, *Nucl. Instrum. & Meth.* **200**, 605 (1982).
- [24] A. Laoutaris, I. Madesis, A. Dimitriou, A. Lagoyannis, M. Axiotis, E. P. Benis and T. J. M. Zouros, *Journal of Physics: Conference Series* **635**, 052062 (2015).
- [25] E. P. Benis, M. Zamkov, P. Richard and T. J. M. Zouros, *Nucl. Instrum. & Meth. in Phys. Res. B* **205**, 517 (2003).
- [26] D. Strohschein, D. Röhrbein, T. Kirchner, S. Fritzsche, J. Baran and J. A. Tanis, *Phys. Rev. A* **77**, 022706 (2008).
- [27] M. Zamkov, H. Aliabadi, E. P. Benis, P. Richard, H. Tawara and T. J. M. Zouros, *Phys. Rev. A* **64**, 052702 (2001).
- [28] M. Asimakopoulou, **TARDIS (Transmitted chARGE DIStribution)** - Technical Report, Institute of Nuclear and Particle Physics and Dept. of Physics, University of Athens (2014) (unpublished).
- [29] J. H. Moore, C. C. Davis, M. A. Coplan, *Building Scientific Apparatus* (Cambridge University Press, New York, 2009).

Παράρτημα Α΄

Πίνακες κλασμάτων καταστάσεων φορτίου

Α΄.1 Πίνακες ποσοστών ηλιοειδών καταστάσεων

Οι υπολογισμοί των κλασμάτων φορτίου έγιναν με τις σχέσεις του R.O. Sayer [19] βλ. σχ. Α.1, και την χρήση του λογισμικού TARDIS [28].

Sayer	
<p>Foil Formulas</p> $\bar{q} = z(1 - e^{-55.8 z^{-0.421}})$ $r = 0.38 z^{0.51} \left(\frac{\bar{q}}{z} \left(1 - \frac{\bar{q}}{z} \right) \right)^{0.2}$ $ep = \begin{cases} 0 & , z \leq 15 \\ r (0.0007z - 0.7 \frac{u}{c}) & , z \geq 15 \end{cases}$	<p>Gas Formulas</p> $\bar{q} = \begin{cases} z \alpha \frac{u}{c} & , \frac{u}{c} \leq br \\ z(1 - 1.08 e^{-80.1 z^{-0.506} (\frac{z}{r})^{0.996}}) & , \frac{u}{c} \geq br \end{cases}$ $r = 0.35 z^{0.55} \left(\frac{\bar{q}}{z} \left(1 - \frac{\bar{q}}{z} \right) \right)^{0.27}$ $ep = \begin{cases} 0 & , z \leq 15 \\ r (0.17 + 0.0012 z - 3.3 \frac{u}{c}) & , z \geq 15 \end{cases}$
<p>Gaussian</p> $F_q = 0.398942 \cdot \frac{e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{q - q_{mean}}{r} \right)^2}}{1 + ep \cdot \left(\frac{q - q_{mean}}{r} \right)}$	

Σχήμα Α.1: Οι τύποι του R. O. Sayer που χρησιμοποιούνται στο TARDIS για τον υπολογισμό των κλασμάτων καταστάσεων φορτίου.

Πίνακας Α. 1 : Πιθανότερες δημιουργίες της κατάστασης πορίου B^{3+}

Ion beam energy (MeV)	Terminal Voltage (MV)	Analyzed q	Terminal stripper	Post stripper	Final B^{3+} fraction	Current on target (nA)
5.5	1.38	3	Foil	-	50.0%	-
5.5	1.38	3	Gas	-	15.7%	-
5.5	1.83	2	Foil	Foil	9.4%	-
5.5	1.83	2	Gas	Foil	20.9%	-
5.5	1.83	2	Foil	Gas	16.5%	-
5.5	1.83	2	Gas	Gas	36.6%	-
<hr/>						
8.25	2.06	3	Foil	-	60.7%	-
8.25	2.06	3	Gas	-	38.7%	-
8.25	2.75	2	Foil	Foil	2.0%	-
8.25	2.75	2	Gas	Foil	5.9%	-
8.25	2.75	2	Foil	Gas	3.9%	-
8.25	2.75	2	Gas	Gas	11.1%	-
<hr/>						
11	2.75	3	Foil	-	60.2%	-
11	2.75	3	Gas	-	38.7%	-
11	3.67	2	Foil	Foil	0.5%	-
11	3.67	2	Gas	Foil	1.5%	-
11	3.67	2	Foil	Gas	0.8%	-
11	3.67	2	Gas	Gas	2.4%	-
<hr/>						
16	4.00	3	Foil	-	47.5 %	-
16	4.00	3	Gas	-	68.8%	-
16	5.33	2	Foil	Foil	0.0%	-
16	5.33	2	Gas	Foil	0.1%	-
16	5.33	2	Foil	Gas	0.0%	-
16	5.33	2	Gas	Gas	0.1%	-

Πίνακας Α'.2: Πιθανότερες δημιουργίες της κατάστασης φορτίου C^{4+}

Ion beam energy (MeV)	Terminal Voltage (MV)	Analyzed q	Terminal stripper	Post stripper	Final C^{4+} fraction	Current on target (nA)
6	1.20	4	Foil	-	12.0%	-
6	1.20	4	Gas	-	0.37%	-
6	1.50	3	Foil	Foil	29.5%	-
6	2.00	2	Gas	Foil	23.9%	-
6	1.50	3	Foil	Gas	33%	-
6	2.00	2	Gas	Gas	26.8%	-
<hr/>						
9	1.80	4	Foil	-	26.0%	-
9	1.80	4	Gas	-	2.8%	-
9	2.25	3	Foil	Foil	18.5%	-
9	2.25	3	Gas	Foil	19.7%	-
9	2.25	3	Foil	Gas	30.0%	0.8
9	2.25	3	Gas	Gas	31.9%	-
<hr/>						
12	2.40	4	Foil	-	38.7%	2
12	2.40	4	Gas	-	8.5%	-
12	3.00	3	Foil	Foil	9.0%	0.3
12	3.00	3	Gas	Foil	14.3%	-
12	3.00	3	Foil	Gas	16.4%	3.5
12	3.00	3	Gas	Gas	26.0%	-
<hr/>						
18	50	4	Foil	-	53.8 %	20
18	47	4	Gas	-	27.5%	-
18	31	3	Foil	Foil	1.9%	-
18	35	2	Gas	Foil	4.5%	-
18	45	3	Foil	Gas	3.0%	-
18	45	2	Gas	Gas	7.2%	-

Πίνακας Α.3: Πιθανότητες δημιουργίας της κατάστασης ποτίου N^{5+}

Ion beam energy (MeV)	Terminal Voltage (MV)	Analyzed q	Terminal stripper	Post stripper	Final N^{5+} fraction	Current on target (nA)
7	1.17	5	Foil	-	1.2%	-
7	1.17	5	Gas	-	0.0%	-
7	1.75	3	Foil	Foil	24.9%	-
7	1.75	3	Gas	Foil	20.7%	-
7	1.75	3	Foil	Gas	14.2%	-
7	1.75	3	Gas	Gas	11.8%	-
10	1.67	5	Foil	-	4.4%	-
10	1.67	5	Gas	-	0.0%	-
10	2.50	3	Foil	Foil	17.0%	-
10	2.50	3	Gas	Foil	28.7%	-
10	2.50	3	Foil	Gas	18.5%	-
10	2.50	3	Gas	Gas	31.2%	-
14	2.33	5	Foil	-	9.9%	-
14	2.33	5	Gas	-	0.0%	-
14	2.80	4	Foil	Foil	20.0%	-
14	3.50	3	Gas	Foil	21.4%	-
14	2.80	4	Foil	Gas	29.5%	-
14	3.50	3	Gas	Gas	31.6%	-
21	3.50	5	Foil	-	23.9%	-
21	3.50	5	Gas	-	2.6%	-
21	4.20	4	Foil	Foil	10.6%	-
21	4.20	4	Gas	Foil	9.5%	-
21	4.20	4	Foil	Gas	18.7%	-
21	4.20	4	Gas	Gas	16.7%	-

Πίνακας Α'.4: Πιθανότερες δημιουργίες της κατάστασης φορτίου O^{6+}

Ion beam energy (MeV)	Terminal Voltage (MV)	Analyzed q	Terminal stripper	Post stripper	Final O^{6+} fraction	Current on target (nA)
8	1.14	6	Foil	-	0.1%	-
8	1.14	6	Gas	-	0.0%	-
8	2.00	3	Foil	Foil	13.3%	-
8	2.00	3	Gas	Foil	16.6%	-
8	2.00	3	Foil	Gas	3.3%	-
8	2.00	3	Gas	Gas	4.1%	-
16	2.29	6	Foil	-	0.4%	-
16	2.29	6	Gas	-	0.0%	-
16	3.20	4	Foil	Foil	23.3%	-
16	4.00	3	Gas	Foil	0.0%	-
16	3.20	4	Foil	Gas	23.5%	-
16	4.00	3	Gas	Gas	0.0%	-
20	2.86	6	Foil	-	1.3%	-
20	2.86	6	Gas	-	0.0%	-
20	4.00	4	Foil	Foil	0.0%	-
24	4.00	4	Gas	Foil	18.7%	-
24	4.00	4	Foil	Gas	0.0%	-
24	4.00	4	Gas	Gas	24.7%	-
21	3.43	6	Foil	-	5.4 %	-
21	3.43	6	Gas	-	0.1%	-
21	4.00	5	Foil	Foil	13.7%	-
21	4.80	4	Gas	Foil	0.0%	-
21	4.00	5	Foil	Gas	21.1%	-
21	4.80	4	Gas	Gas	0.0%	-

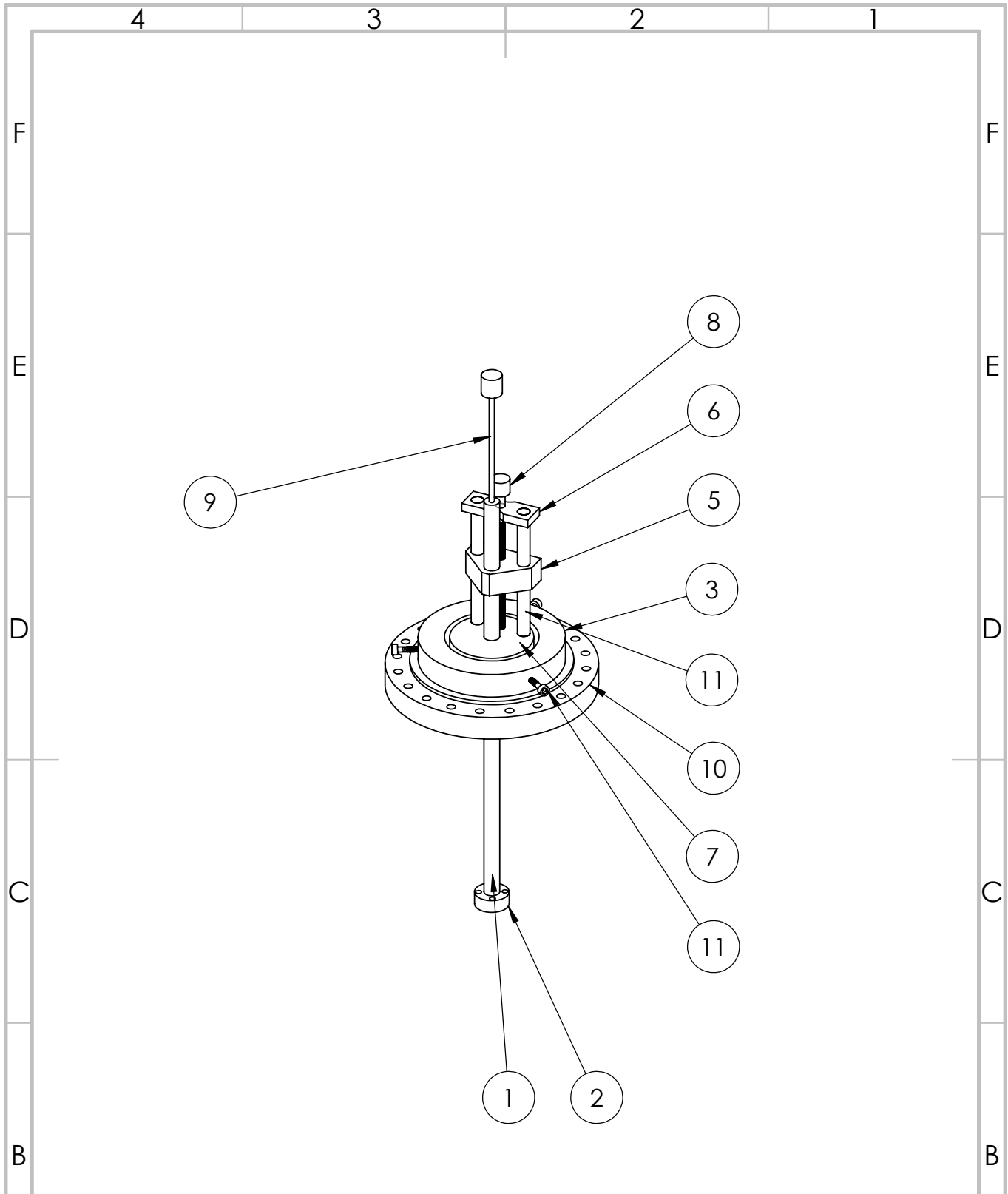
Πίνακας Α.5: Πιθανότερες δημιουργίες της κατάστασης φορτίου F^{7+}

Ion beam energy (MeV)	Terminal Voltage (MV)	Analyzed q	Terminal stripper	Post stripper	Final F^{7+} fraction	Current on target (nA)
9.5	1.19	7	Foil	-	0.0%	-
9.5	1.19	7	Gas	-	0.0%	-
9.5	1.90	4	Foil	Foil	8.1%	-
9.5	1.90	4	Gas	Foil	1.2%	-
9.5	1.90	4	Foil	Gas	0.8%	-
9.5	1.90	4	Gas	Gas	0.1%	-
14.25	1.78	7	Foil	-	0.0%	-
14.25	1.78	7	Gas	-	0.0%	-
14.25	2.85	4	Foil	Foil	5.4%	-
14.25	2.85	4	Gas	Foil	8.4%	-
14.25	2.85	4	Foil	Gas	5.4%	-
14.25	2.85	4	Gas	Gas	2.6%	-
19	2.38	7	Foil	-	0.0%	-
19	2.38	7	Gas	-	0.0%	-
19	3.80	4	Foil	Foil	18.0%	-
19	3.80	4	Gas	Foil	18.0%	-
19	3.80	4	Foil	Gas	11.0%	-
19	3.80	4	Gas	Gas	11.0%	-
28.5	3.56	7	Foil	-	0.0%	-
28.5	3.56	7	Gas	-	0.0%	-
28.5	5.70	4	Foil	Foil	16.8%	-
28.5	5.70	4	Gas	Foil	22.2%	-
28.5	5.70	4	Foil	Gas	19.8%	-
28.5	5.70	4	Gas	Gas	26.2%	-

Παράρτημα Β΄

Μηχανολογικά σχέδια

Β΄.1 Μηχανολογικά σχέδια της βάσης ευθυγράμμισης του κελιού στόχου



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APP'VD					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

APAPES GAS CELL TRANSLATION STAGE

DWG NO.

Assem131215

A4

SCALE:1:10

SHEET 1 OF 12

A

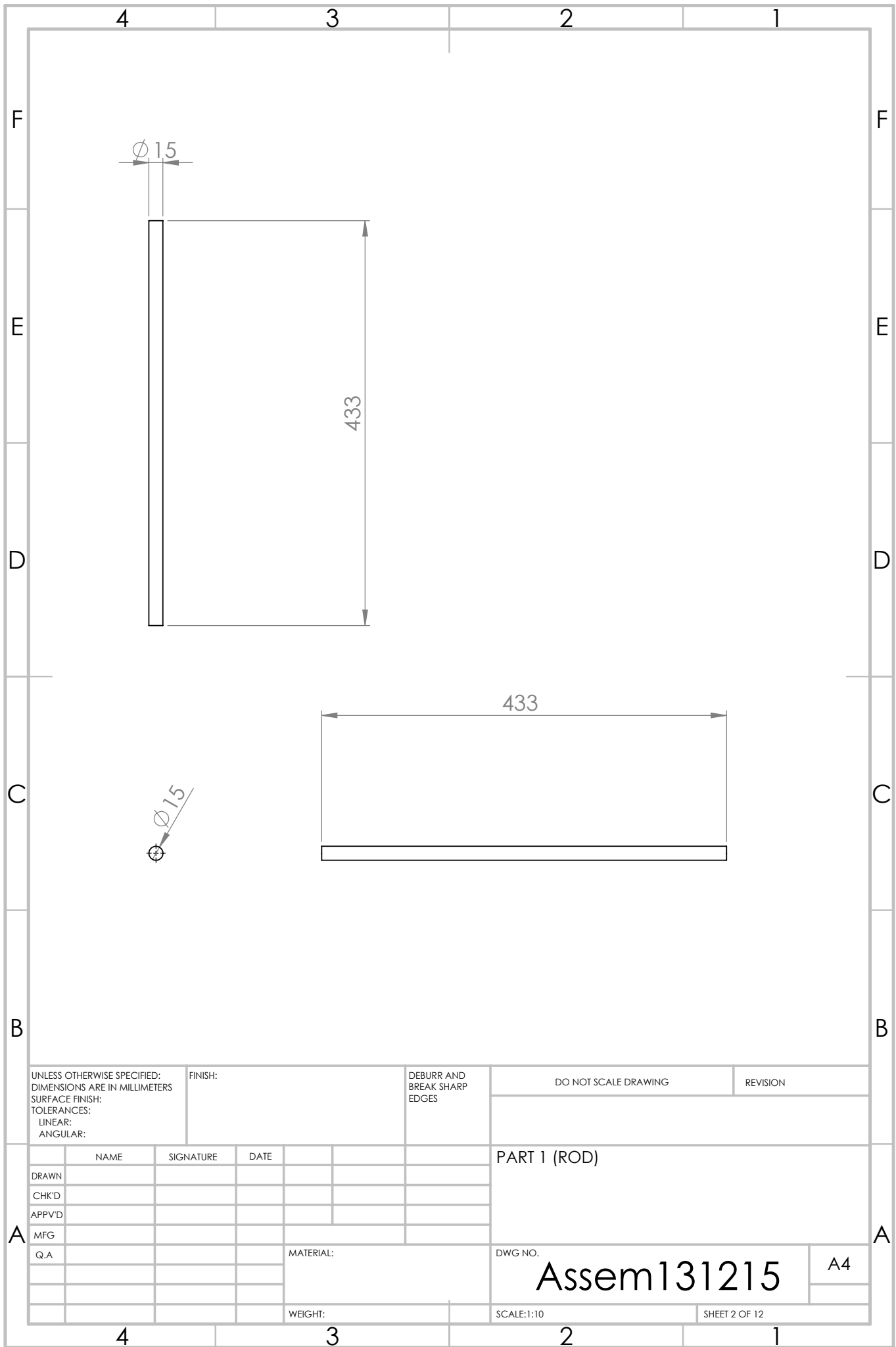
A

4

3

2

1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPVD					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

PART 1 (ROD)

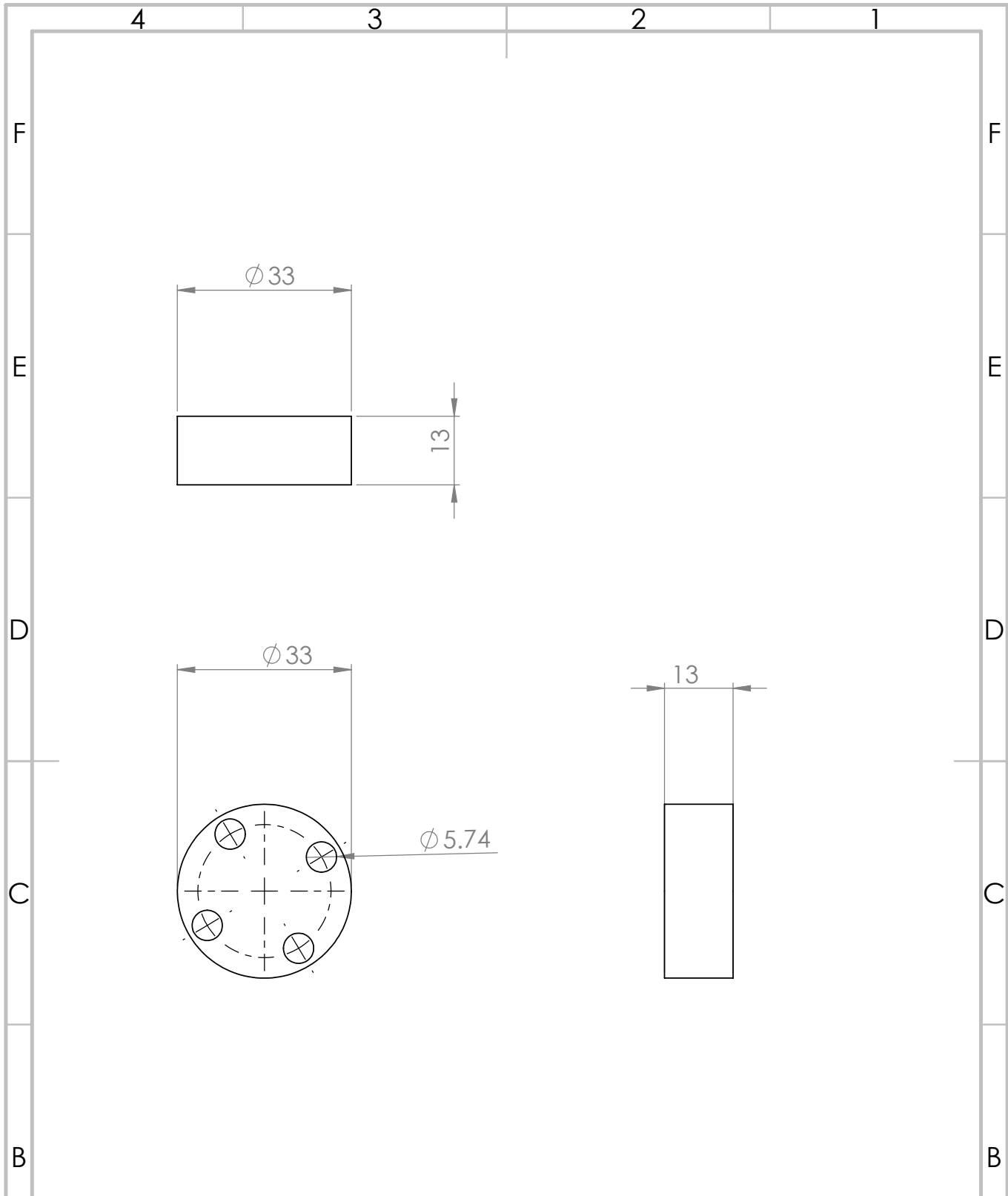
DWG NO.

Assem131215

A4

SCALE:1:10

SHEET 2 OF 12



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APP'VD					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

TITLE: PART 2 (CONNECTION WITH GAS CELL)

DWG NO.

Assem131215

A4

SCALE:1:10

SHEET 3 OF 12

A

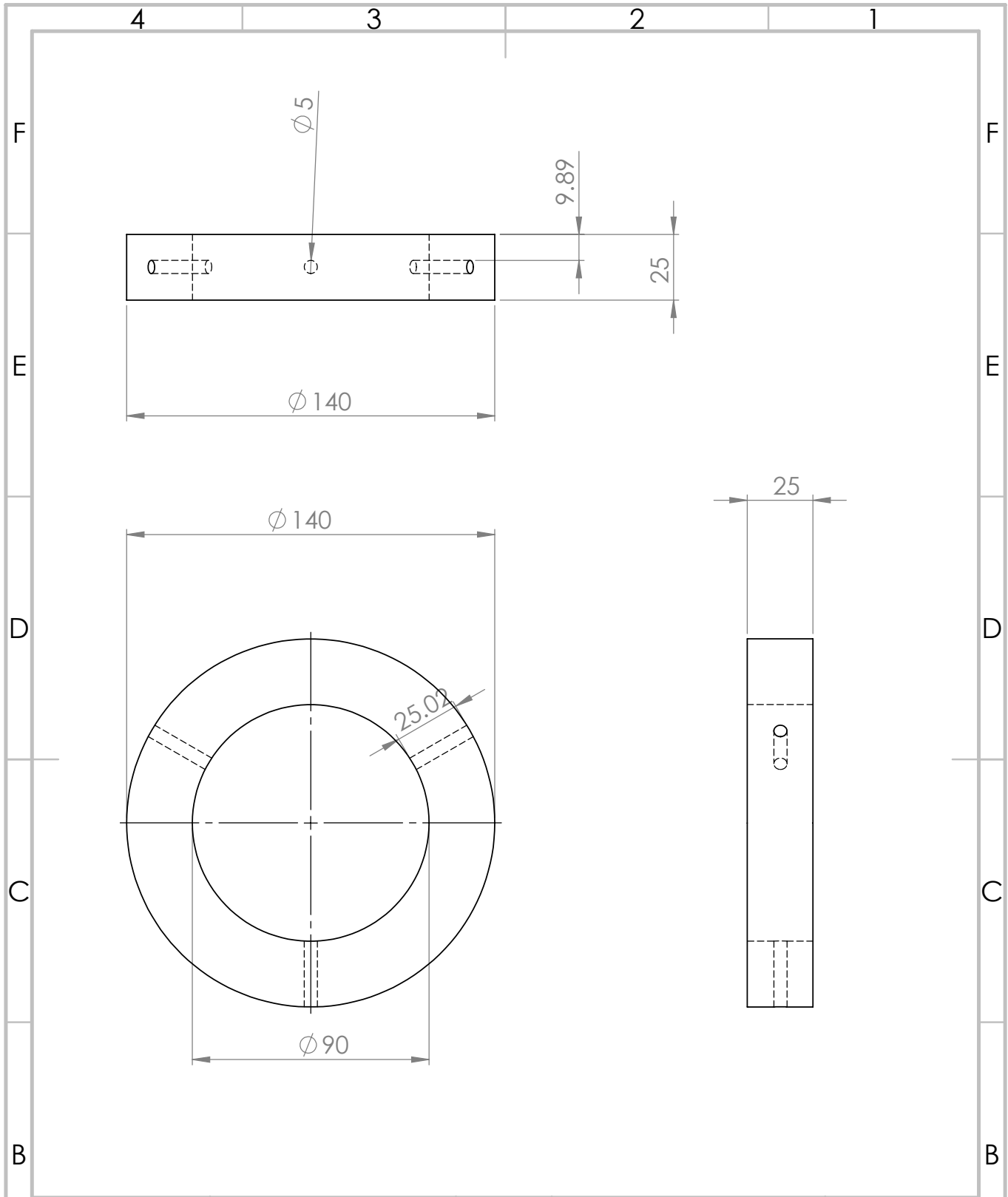
A

4

3

2

1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPVD					
MFG					
Q.A					

PART 3

MATERIAL:

DWG NO.

Assem131215

A4

WEIGHT:

SCALE:1:10

SHEET 4 OF 12

A

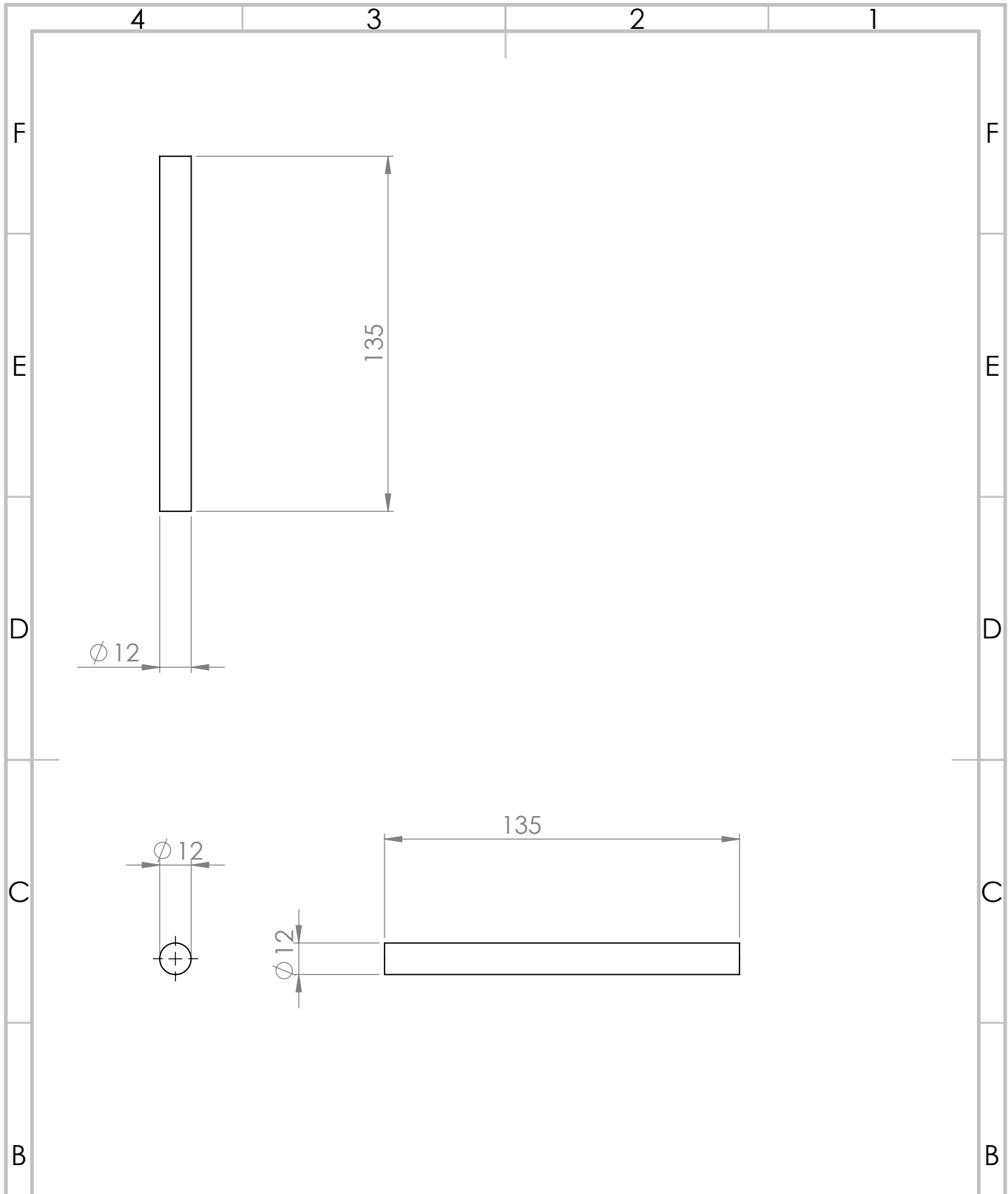
A

4

3

2

1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPVD					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

PART 4 (ROD) X2

DWG NO.

Assem131215

A4

SCALE:1:10

SHEET 5 OF 12

A

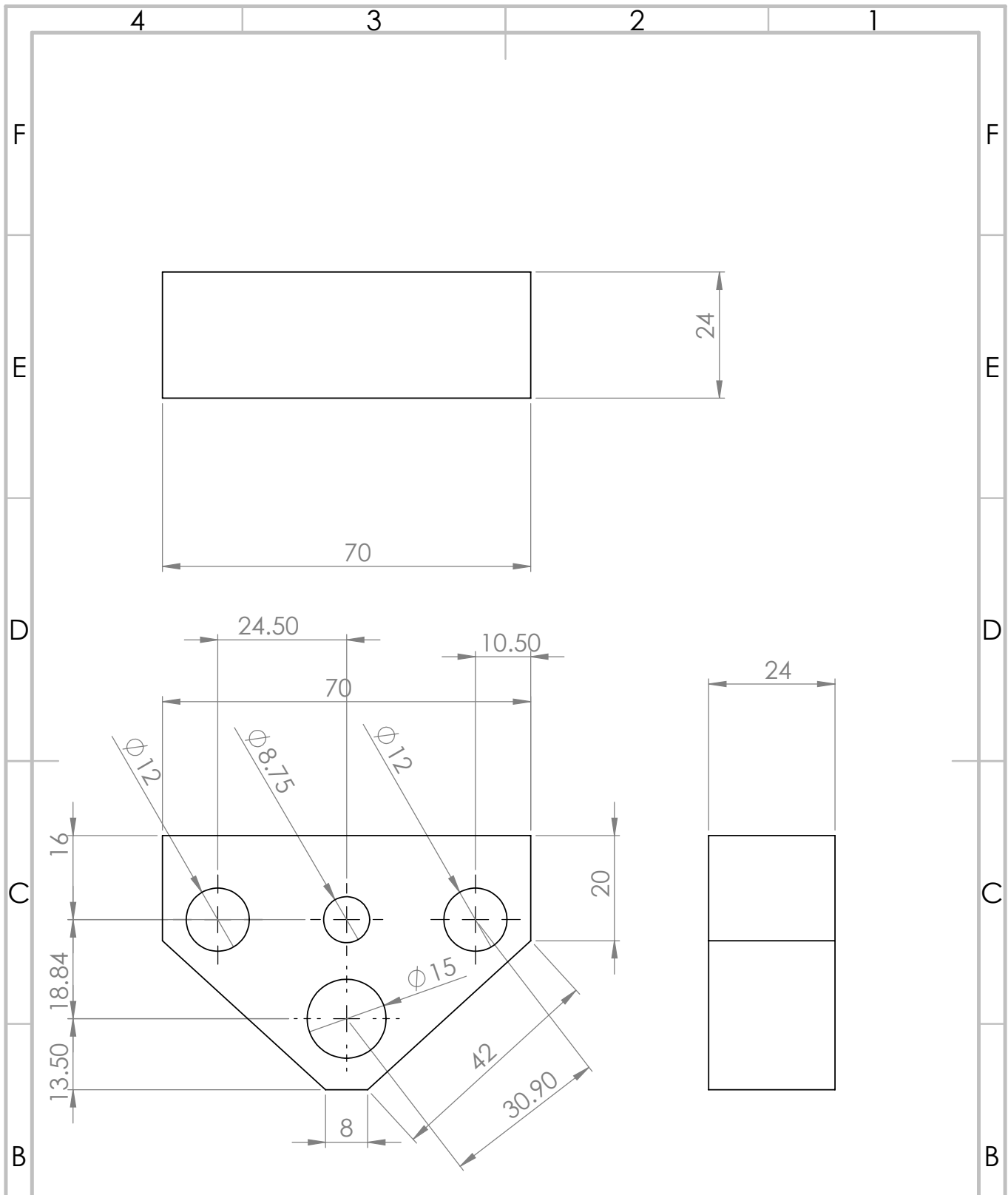
A

4

3

2

1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN				
CHK'D				
APPVD				
MFG				
Q.A				
				MATERIAL:
				WEIGHT:

PART 5 (LIFTER)

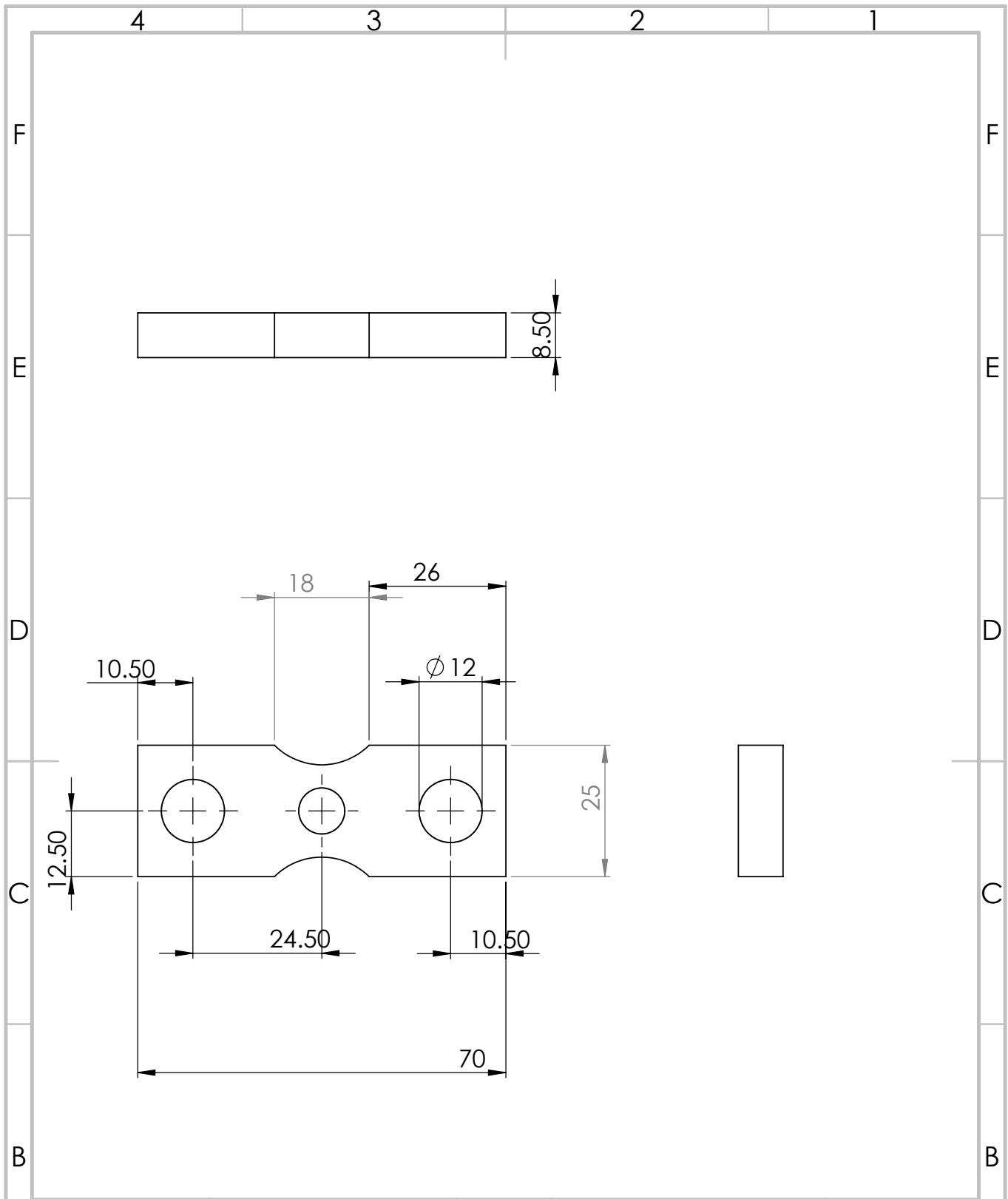
DWG NO.

Assem131215

A4

SCALE:1:10

SHEET 6 OF 12



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APP'VD					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

PART 6

DWG NO.

Assem131215

A4

SCALE:1:10

SHEET 7 OF 12

A

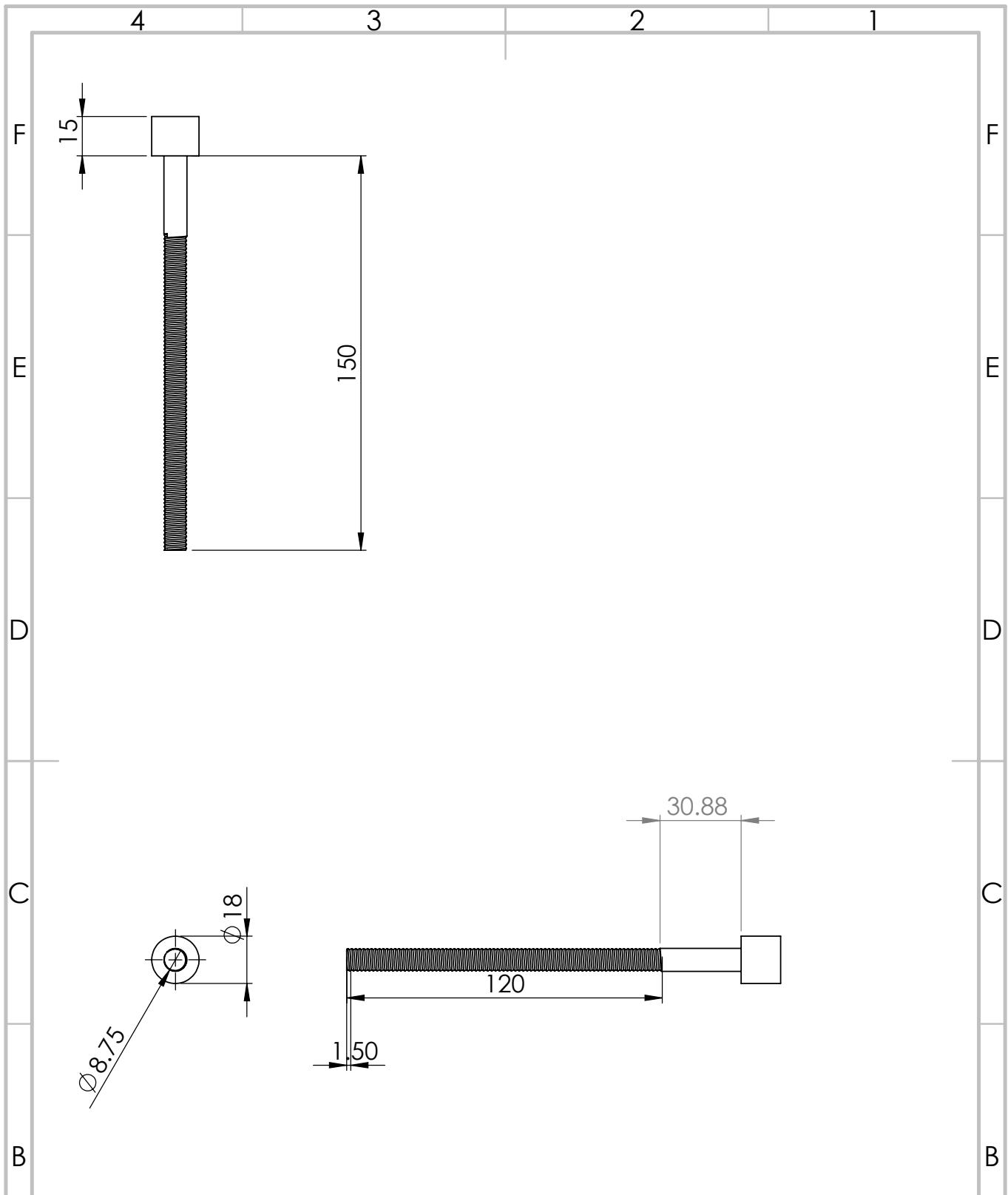
A

4

3

2

1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

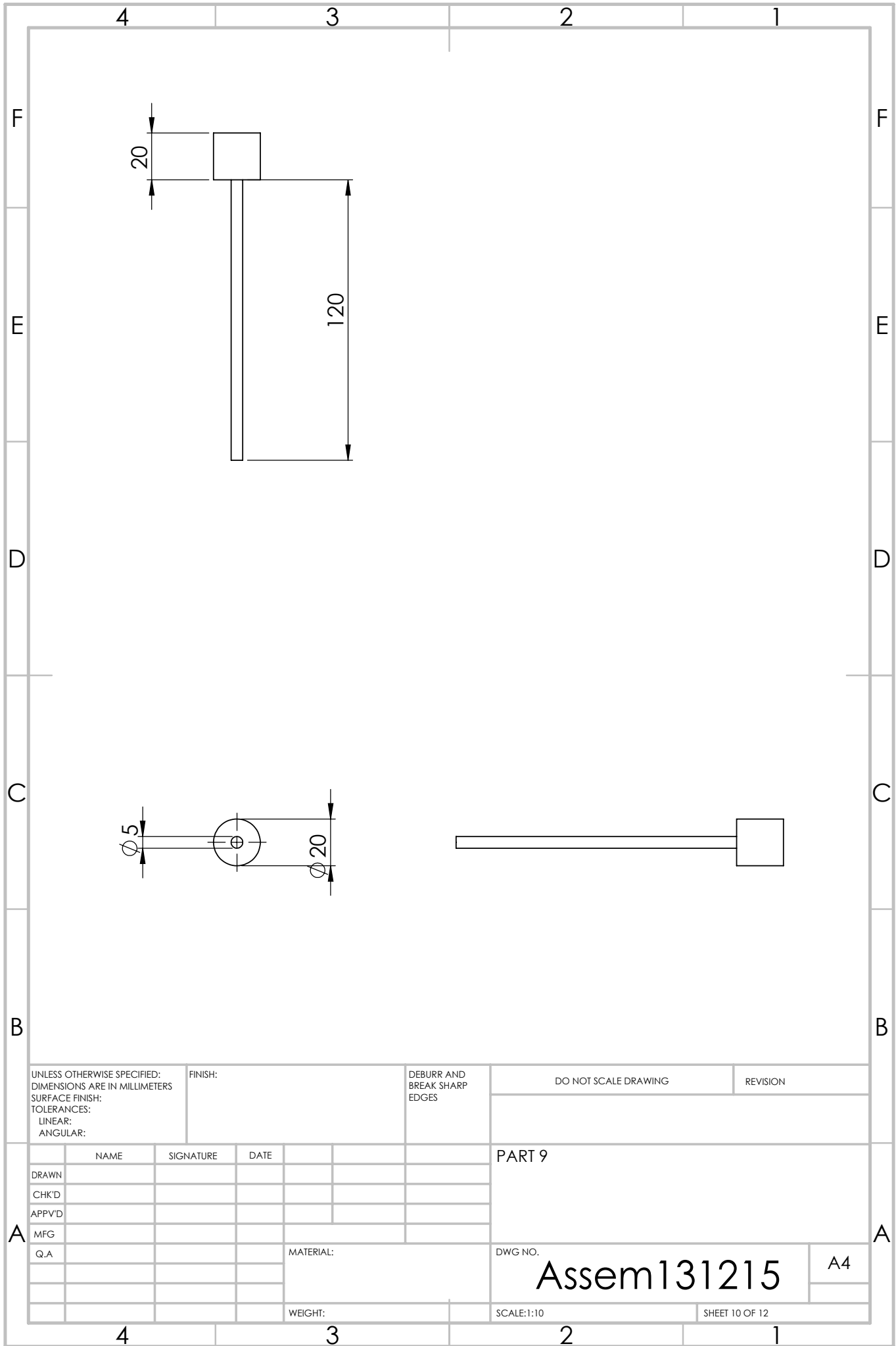
FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

				PART 8			
NAME	SIGNATURE	DATE					
DRAWN							
CHK'D							
APPVD							
MFG							
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.	
						Assem131215	A4
				WEIGHT:		SCALE:1:10	SHEET 9 OF 12



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APP'VD					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

PART 9

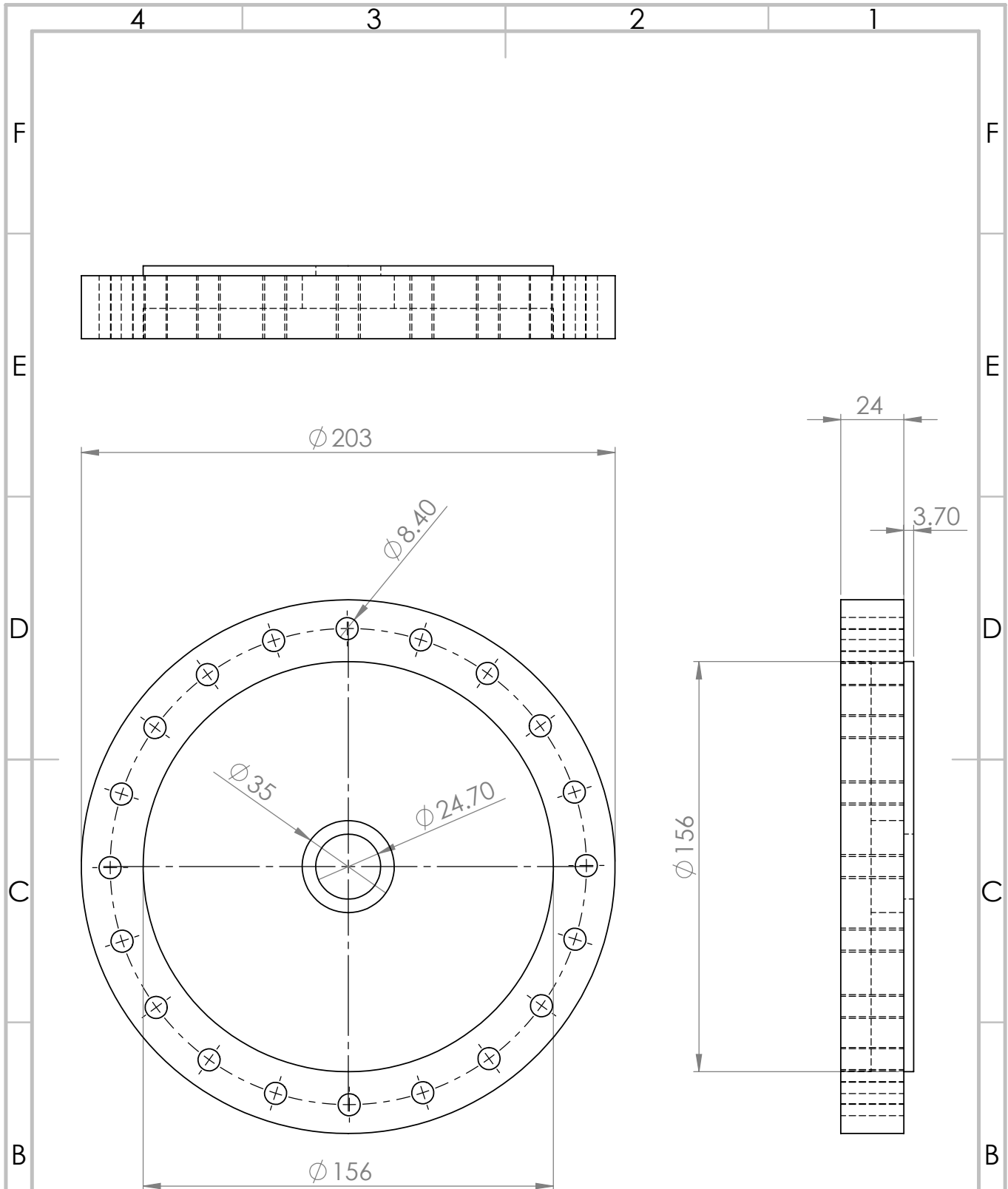
DWG NO.

Assem131215

A4

SCALE:1:10

SHEET 10 OF 12



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APP'VD					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

PART 10

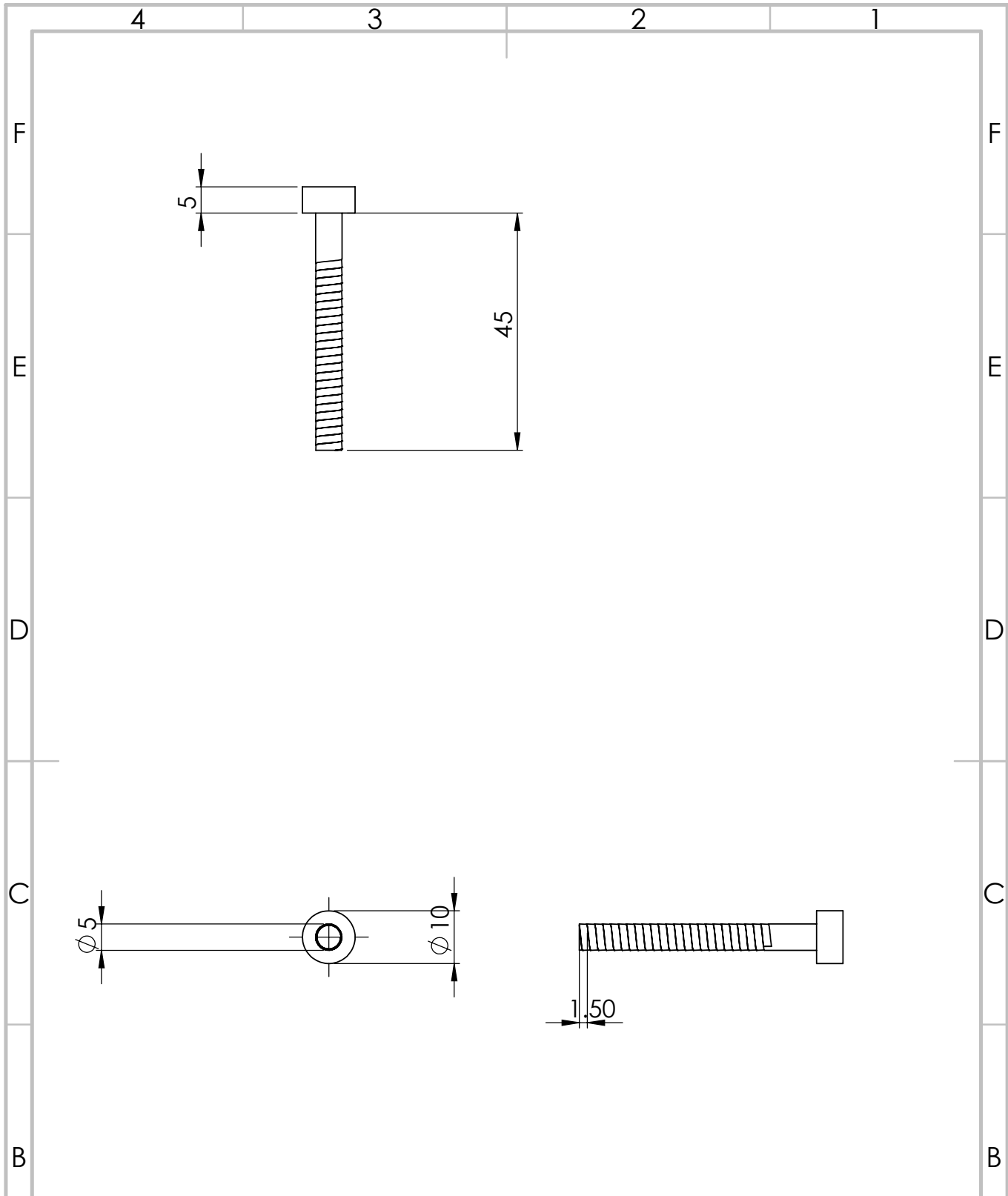
DWG. NO.

Assem131215

A4

SCALE:1:10

SHEET 11 OF 12



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APP'VD			
MFG			
Q.A			

PART 11 (X3)

MATERIAL:

DWG NO.

Assem131215

A4

WEIGHT:

SCALE:1:10

SHEET 12 OF 12

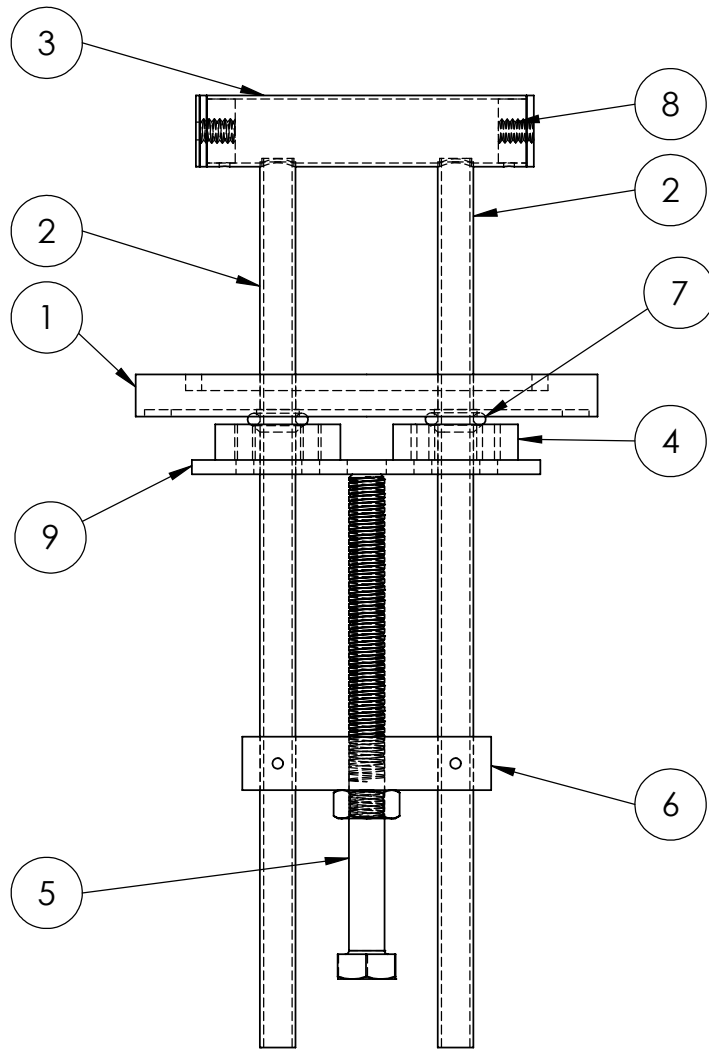
4

3

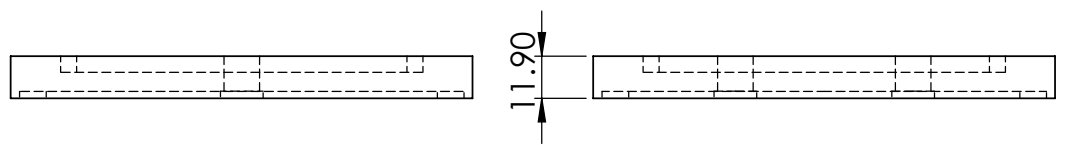
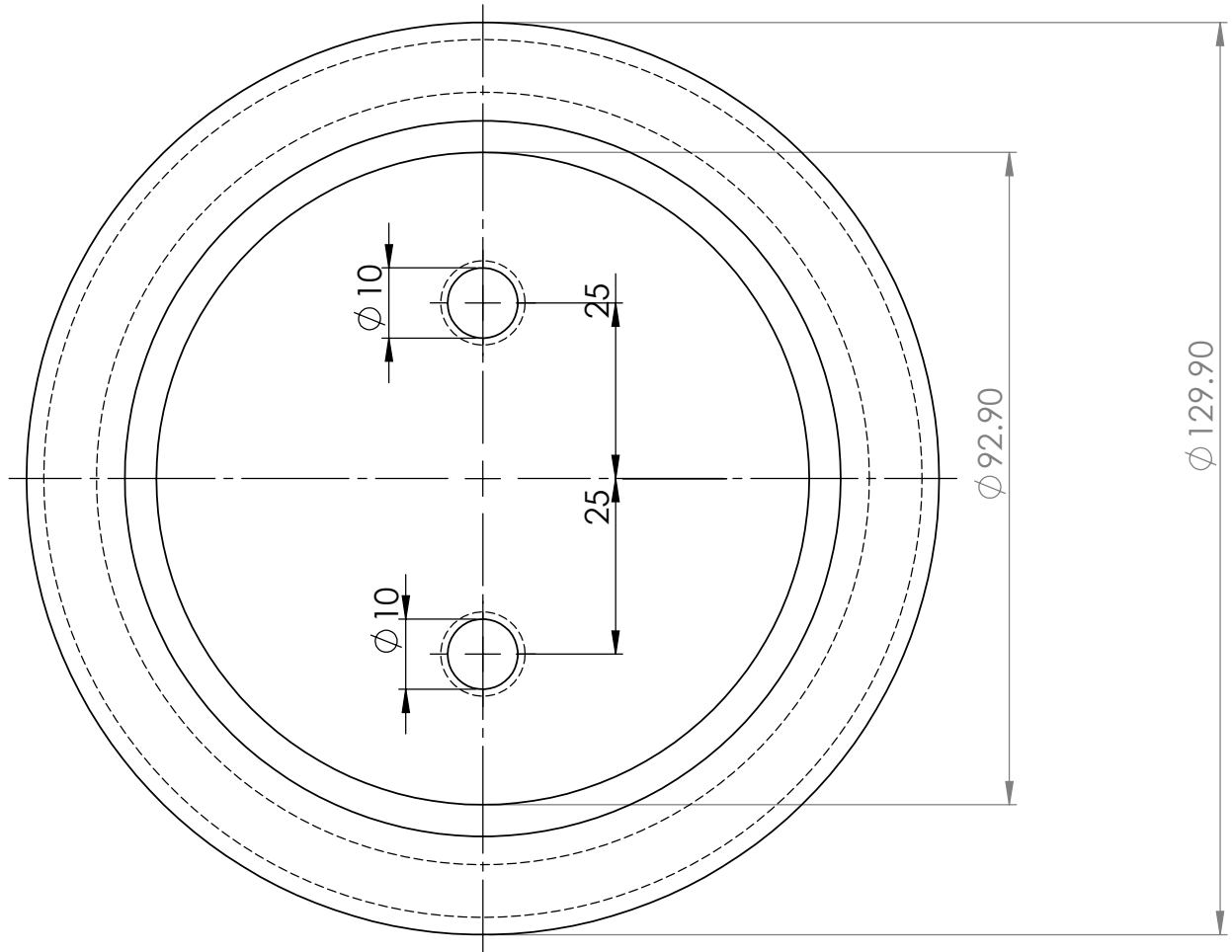
2

1

Β.2 Μηχανολογικά σχέδια του αέριου απογυμνωτή ι- όντων



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION			
DRAWN							GAS STRIPPER SYSTEM					
CHK'D												
APPVD												
MFG												
Q.A							MATERIAL:		DWG NO.		A4	
WEIGHT:							SCALE: 1:5		SHEET 1 OF 10			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

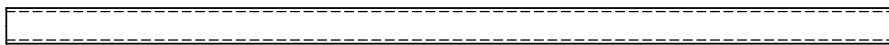
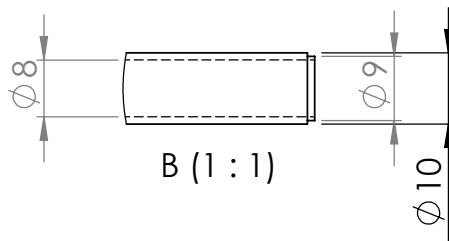
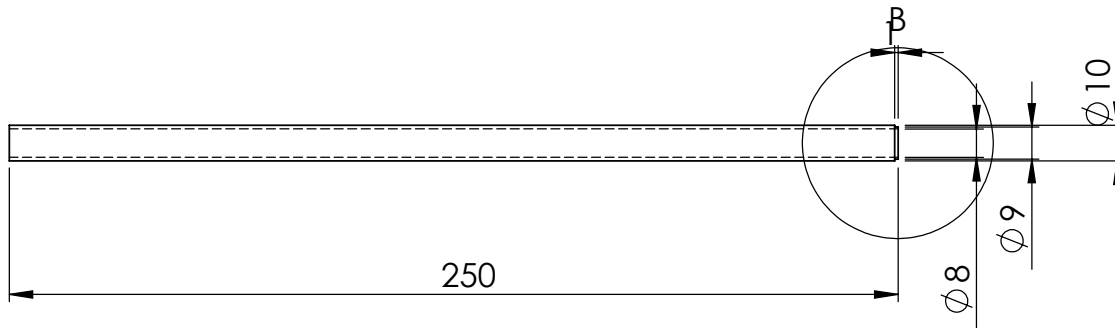
DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

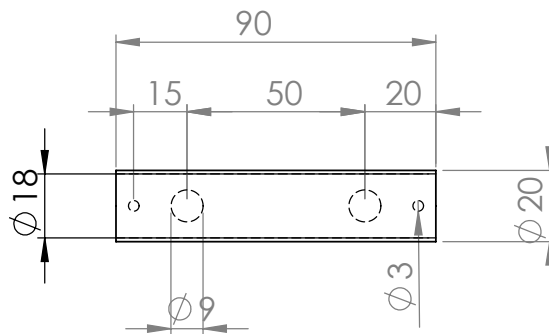
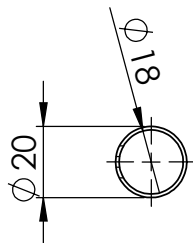
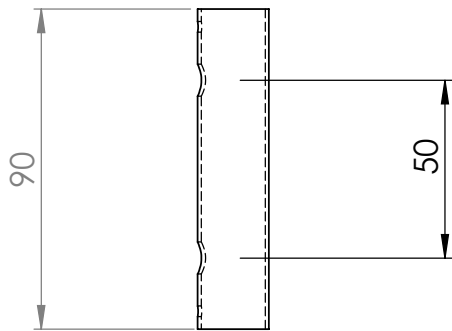
REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APPVD			
MFG			
Q.A			

PART 1 (FLANGE)	
DWG NO.	GASSTRIPPERISOK100150119
	A4
WEIGHT:	SCALE: 1:5
	SHEET 2 OF 10



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		PART 2 (GAS INSERTING TUBE) (X2)			
CHK'D									
APPVD									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.		GASSTRIPPERISOK100150119	
						SCALE:1:5		A4	
				WEIGHT:		SHEET 3 OF 10			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

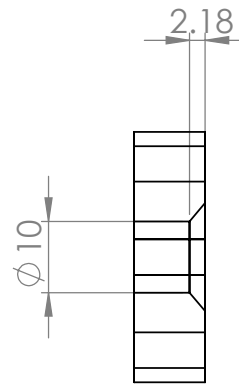
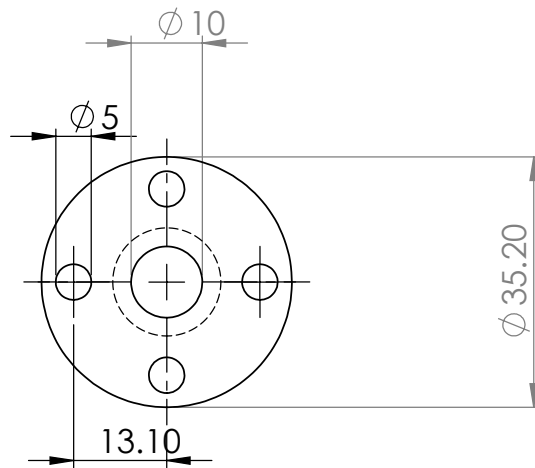
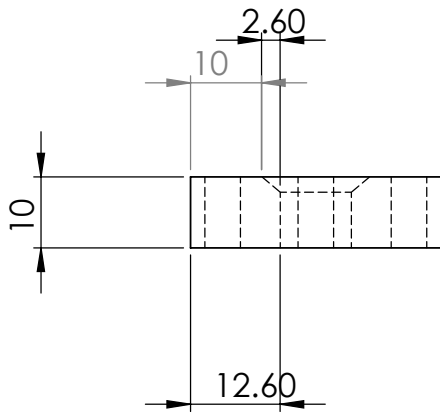
DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

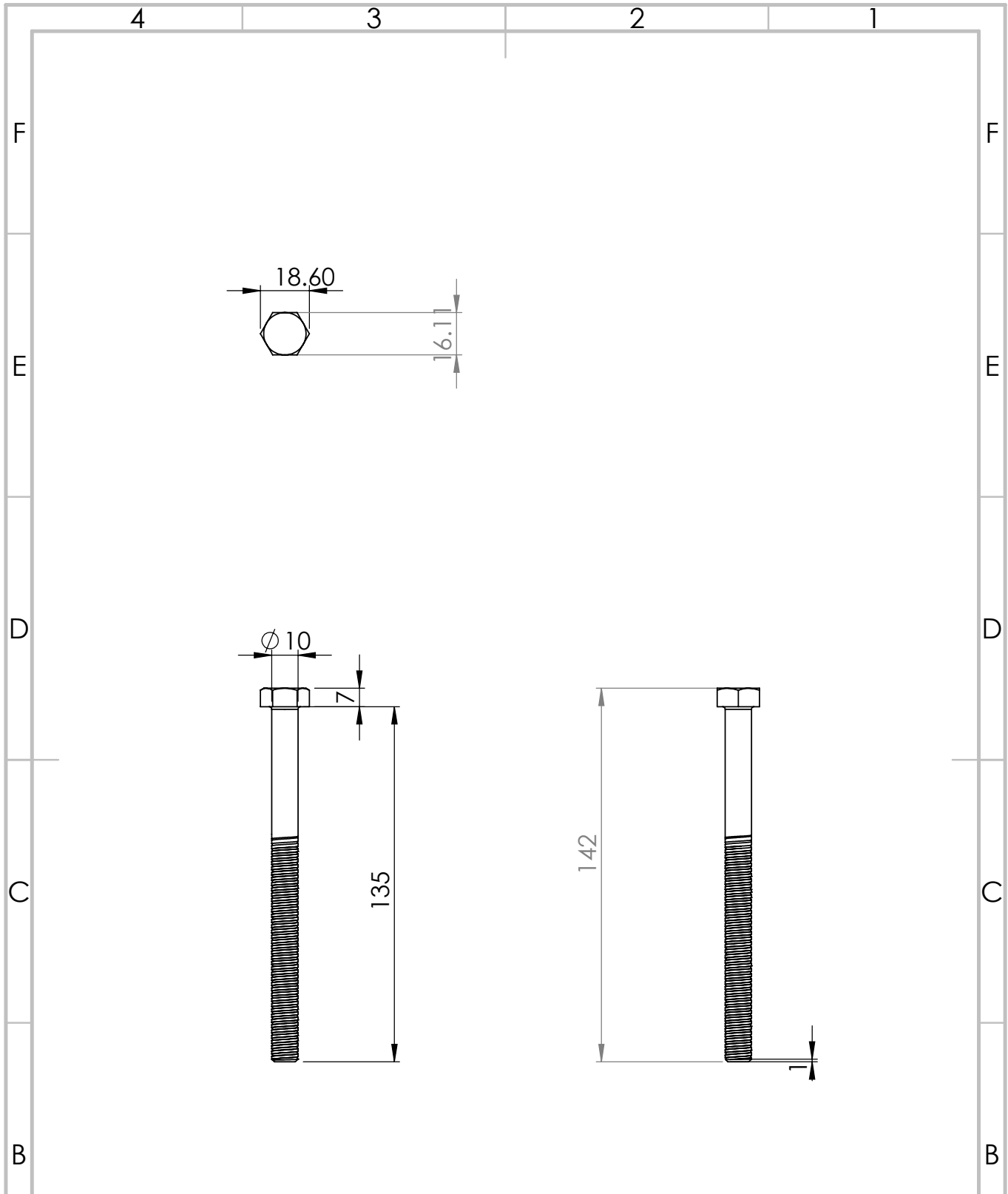
REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPVD					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

PART 3 (STRIPPER TUBE)		
DWG NO.	GASSTRIPPERISOK100150119	A4
SCALE: 1:5		SHEET 4 OF 10



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		PART 4 (X2)			
CHK'D									
APPVD									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.		GASSTRIPPERISOK100150119	
						SCALE:1:5		A4	
				WEIGHT:		SHEET 5 OF 10			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPVD					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

PART 5

DWG NO.
GASSTRIPPERISOK100150119

A4

SCALE:1:5

SHEET 6 OF 10

A

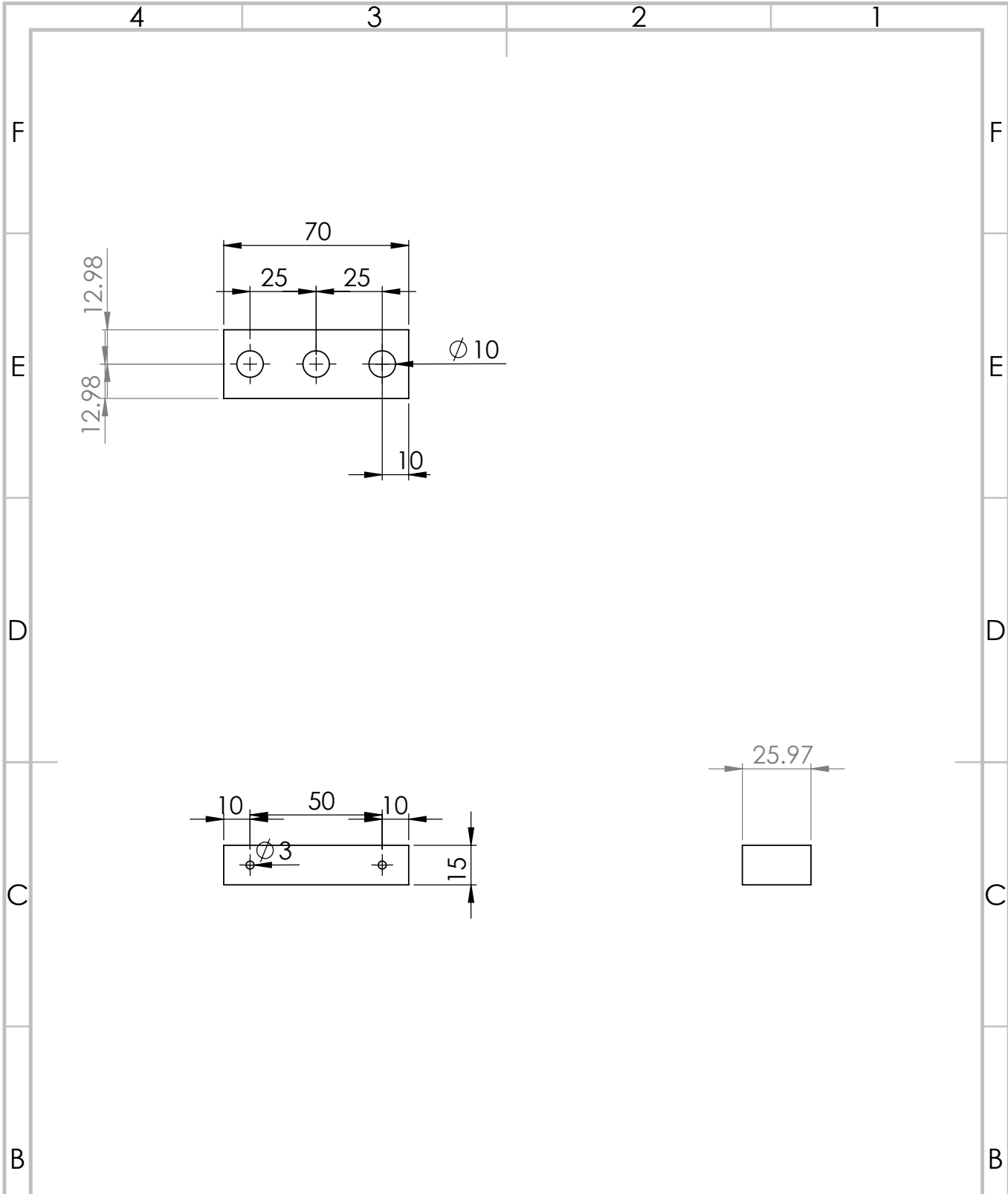
A

4

3

2

1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APP'VD					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

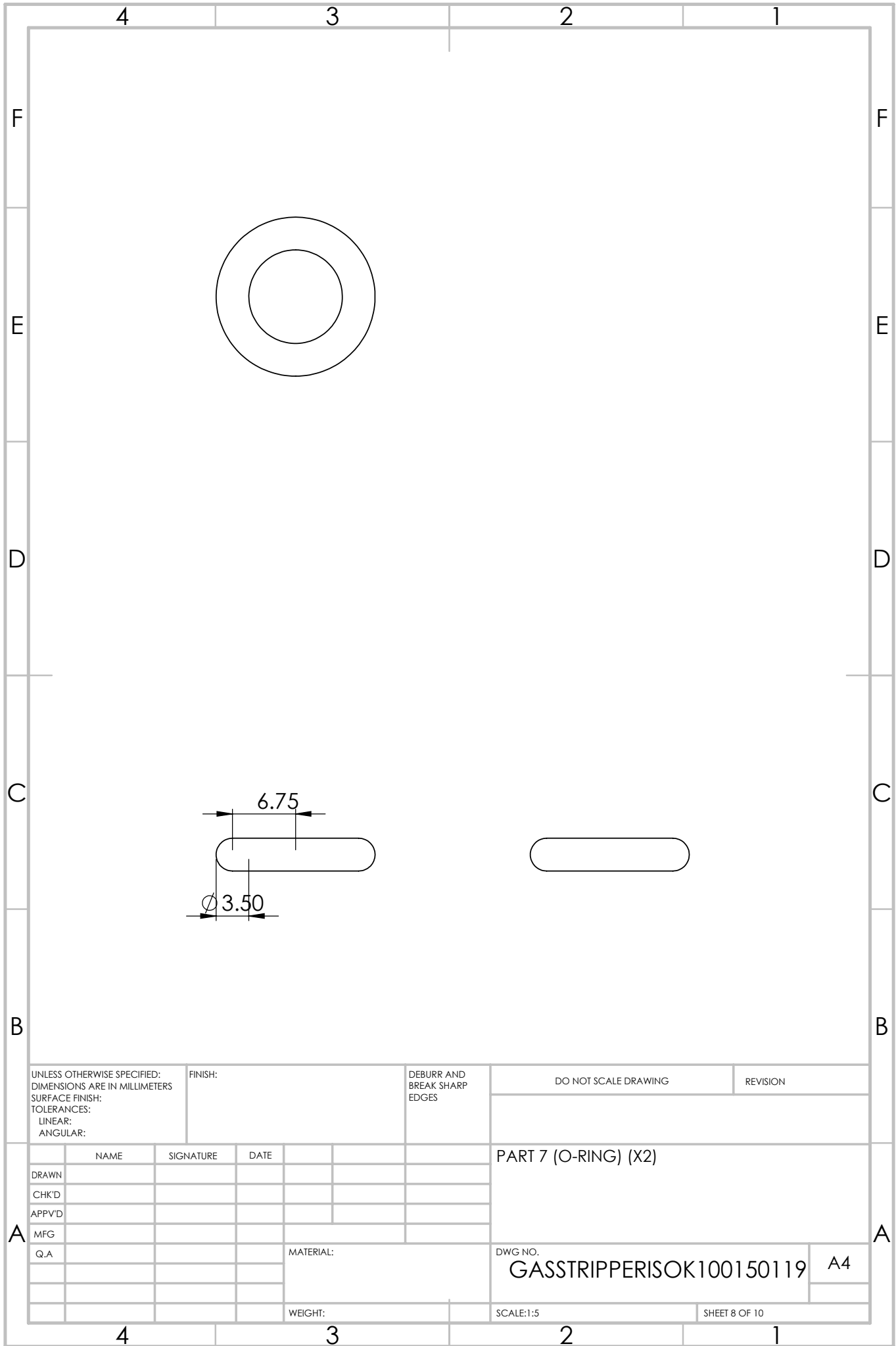
PART 6

DWG NO.
GASSTRIPPERISOK100150119

A4

SCALE:1:5

SHEET 7 OF 10



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPVD					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

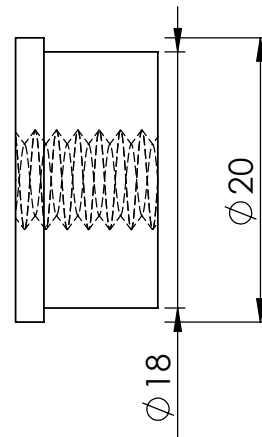
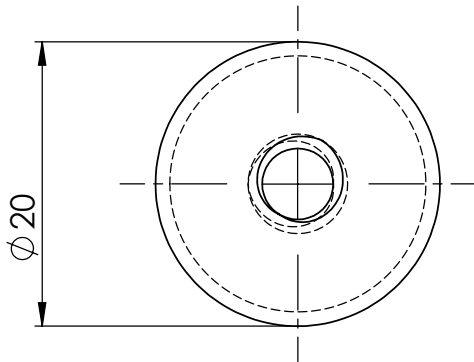
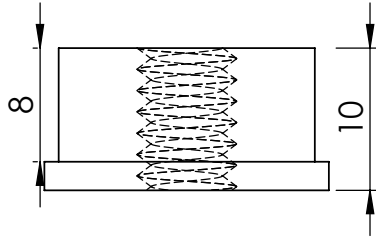
PART 7 (O-RING) (X2)

DWG NO.
GASSTRIPPERISOK100150119

A4

SCALE:1:5

SHEET 8 OF 10



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

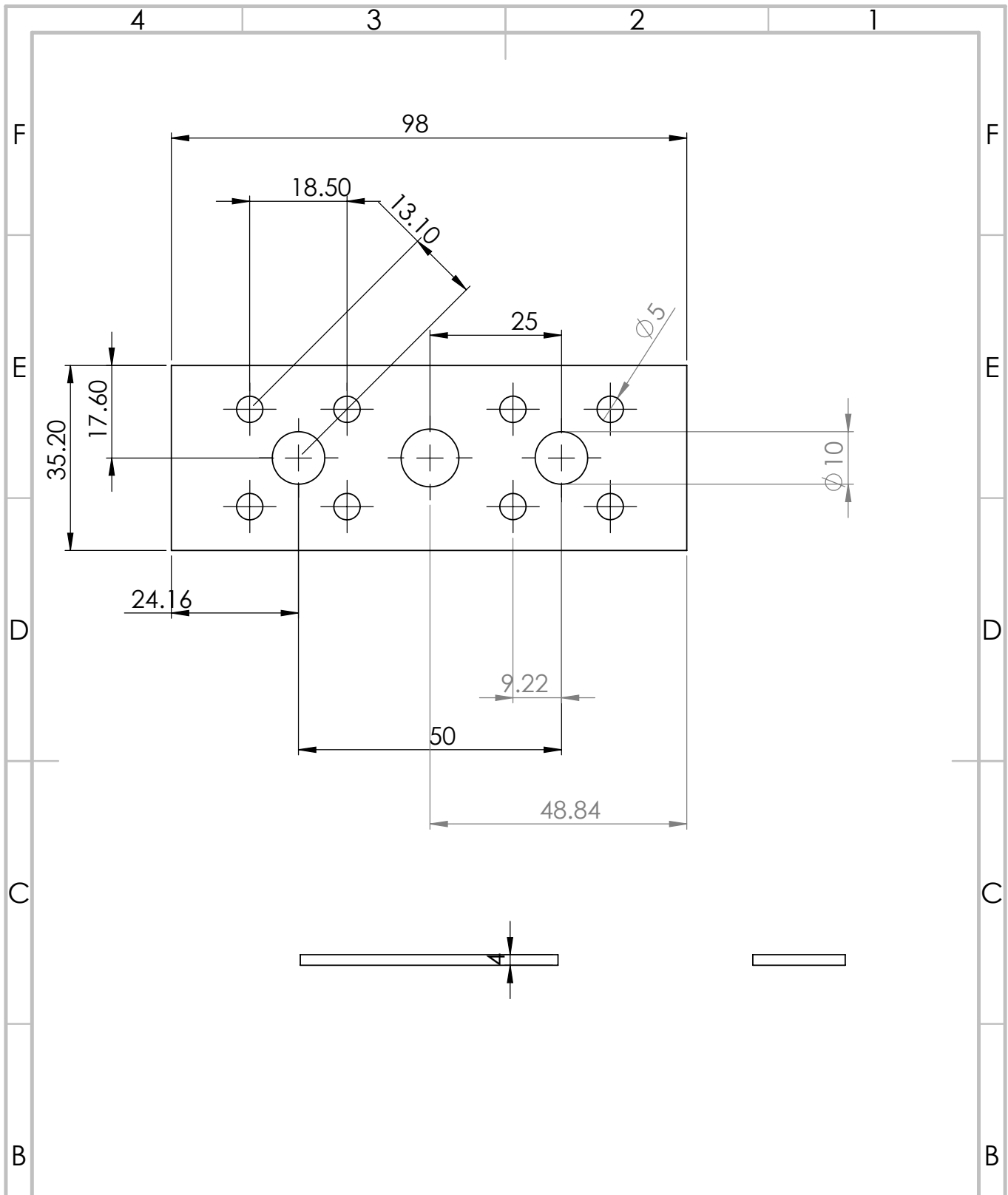
DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPVD					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

PART 8		
DWG NO.	GASSTRIPPERISOK100150119	A4
SCALE: 1:5	SHEET 9 OF 10	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

PART 9

DWG NO.
GASSTRIPPERISOK100150119

A4

SCALE:1:5

SHEET 10 OF 10

A

A

4

3

2

1

Παράρτημα Γ'

Διεθνείς δημοσιεύσεις

Γ'.1 Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

1. *Determination of the solid angle and response function of a hemispherical spectrograph with injection lens for Auger electrons emitted from long lived projectile states*, S. Doukas, I. Madesis, A. Dimitriou, **A. Laoutaris**, T. J. M. Zouros and E. P. Benis, [Review of Scientific Instruments](#) **86** (2015) 043111.
2. *Voltage optimization of a 4-element Injection Lens on a hemispherical spectrograph with virtual entry aperture*, G. Martínez, M. Fernández-Martín, O. Sise, I. Madesis, A. Dimitriou, **A. Laoutaris** and T. J. M. Zouros, [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B](#) **369** (2016) 92.
3. *High Resolution Auger Projectile Electron Spectroscopy of Li-like Ions Produced by Electron Capture in collision of He-like ions with Gaseous targets*, A. Dimitriou, **A. Laoutaris**, I. Madesis, S. Doukas, E. P. Benis, B. Sulik, I. Valastyán, O. Sise, A. Lagoyannis, M. Axiotis, T. Kichner and T. J. M. Zouros, accepted [Journal of Atomic, Molecular, Condensate and Nano](#) 2016.
4. *The voltage optimization of a four-element lens used on a hemispherical spectrograph with virtual entry for highest energy resolution*, O. Sise, G. Martínez, I. Madesis, **A. Laoutaris**, M. Fernández-Martín, C. Nounis and T. J. M. Zouros, submitted [J. of Electron Spectroscopy and Related Phenomena](#) 2016.

Γ'.2 Πρακτικά διεθνών συνεδρίων

1. *Investigation of the dependence of the energy resolution of a hemispherical deflection analyzer on the distance of the position sensitive detector from the focal plane*, C. Nounis, **A. Laoutaris**, I. Madesis, A. Dimitriou, O. Sise, E.P. Benis and T. J. M. Zouros, [Proceedings of XXIX International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions \(ICPEAC2015\)](#), [J. of Physics: Conference Series](#) **635** (2015) 052063.

2. *Separation and solid angle correction of the metastable $1s2s2p^4P$ Auger yield produced in ion-atom collisions using the biased as cell technique: A tool for the determination of the population mechanisms*, I. Madesis, **A. Laoutaris**, S. Doukas, A. Dimitriou, E.P. Benis and T. J. M. Zouros, [Proceedings of XXIX International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions \(ICPE-AC2015\)](#), J. of Physics: Conference Series **635** (2015) 052082.
3. *Optimal operation of a 4-element injection lens in a hemispherical spectrograph: FDM/BEM simulation and experimental demonstration*, G. Martínez, I. Madesis, A. Dimitriou, **A. Laoutaris**, O Sise and T. J. M. Zouros, [Proceedings of XXIX International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions \(ICPE-AC2015\)](#), J. of Physics: Conference Series **635** (2015) 052083.
4. *Use of Gas and Foil strippers for the production of He-like ionic beams in both pure ground state ($1s^2$) and mixed states ($1s^2$, $1s2s$) for zero-degree Auger Projectile Electron Spectroscopy*, **A. Laoutaris**, I. Madesis, A. Dimitriou, A. Lagoyannis, M. Axiotis, E. P. Benis and T. J. M. Zouros, [Proceedings of XXIX International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions \(ICPEAC2015\)](#), J. of Physics: Conference Series **635** (2015) 052062.