ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ – ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ – ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Δημήτριος Σταθόπουλος

MSc Αστροφυσικής

"Μελέτη των πλατιών γραμμών απορρόφησης των Si IV και C IV στα υπεριώδη φάσματα των Broad Absorption Line Quasars"

Διδακτορική Διατριβή



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ – ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ – ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Δημήτριος Σταθόπουλος MSc Αστροφυσικής

Μελέτη των πλατιών γραμμών απορρόφησης των Si IV και C IV στα υπεριώδη φάσματα των Broad Absorption Line Quasars

Διδακτορική Διατριβή

 $A\theta \acute{\eta} \nu \alpha \ 2019$

Τριμελής Επιτροπή

1. Εμμανουήλ Δανέζης , Επίκουρος Καθηγητής (Αφυπηρετήσας) (Τμήμα Φυσικής ΕΚΠΑ)

2. Απόστολος Μαστιχιάδης, Καθηγητής (Τμήμα Φυσικής ΕΚΠΑ)

3. Νεκτάριος Βλαχάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής (Τμήμα Φυσικής ΕΚΠΑ)

Ημερομηνία εξέτασης: Ιούνιος 2019

Υπογραφή κύριου επιβλέποντα

Εμμανουήλ Δανέζης

Στην σύζυγό μου Ελένη

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες				
Πρόλογ	ος		1	
Summa	ry		5	
Κεφάλαιο 1.		Broad Absorption Lines Quasars (BALQSOs)	33	
1.1.	Εισ	αγωγή	33	
1.2.	Bro	ad Absorption Line QSOs-BALQSOs	34	
1.2.1.		Broad Absorption Lines (BALs)	36	
1.2.2.		Η περιοχή των πλατιών γραμμών απορρόφησης (BALR)	39	
Κεφάλα	ao 2.	Οι εκροές των BALQSOs	41	
2.1.	Εισ	αγωγή	41	
2.2.	Απά	ό τα ομαλά μοντέλα ανέμων στα μοντέλα πυκνωμάτων	42	
2.2	.1.	Οι άνεμοι των θερμών αστέρων	42	
2.2	.2.	Οι άνεμοι των quasars	44	
2.3.	Μει	οική κάλυψη των πηγών εκπομπής ακτινοβολίας	54	
2.4.	Ημ	εταβλητότητα των BALs	56	
2.4.1.		Μεταβολές στο συνεχές ιονισμού	59	
2.4.2.		Κινήσεις Νεφών	61	
Κεφάλα	uo 3.	Τα ιόντα Si IV και C IV	63	
3.1.	Εισ	αγωγή	63	
3.2.	Γρο	αμμές συντονισμού	63	
3.3.	Ηέ	ννοια του multiplet (πολλαπλότητας) των γραμμών συντονισμού	64	
3.3.1.		Ο συμβολισμός των ενεργειακών καταστάσεων	65	
3.3.2.		Φυσική σημασία	66	
3.4.	Τρι	πλά ιονισμένος άνθρακας (C IV)	67	
3.5.	Τρι	πλά ιονισμένο πυρίτιο (Si IV)	67	
3.6.	Βήμ	ιατα για την αναγνώριση φασματικών γραμμών στο φάσμα ενός qua	isar.69	
Κεφάλαιο 4. Η μέθοδος μελέτης των BALs Si IV και C IV		71		
1.1.	Εισ	αγωγή	71	
1.2.	То	φυσικό μοντέλο της BAL περιοχής	71	
1.3.	То	μαθηματικό μοντέλο GR	73	
1.3	.1.	Η συνάρτηση παρεμβολής	75	

1.3	.2.	Οι κατανομές που ενσωματώνει το μοντέλο	77
1.3	.3.	Το ελαχιστοποιημένο χ2	80
1.3	.4.	Κριτήρια προσομοίωσης των BALs Si IV και C IV	80
1.4.	То	λογισμικό ASTA	84
Κεφάλα	αο 5.	Τα παρατηρησιακά δεδομένα και η μελέτη τους	87
5.1.	Τα	φάσματα των 20 BALQSOs	87
5.2.	ΗE	βάση Δεδομένων SDSS (Sloan Digital Sky Survey Data Release 9 κα	ι 10)87
5.3.	Кρ	ιτήρια Επιλογής Φασμάτων	89
5.4.	Πρ	οετοιμασία φάσματος	90
5.5.	Διο	ιδικασία προσομοίωσης των BALs Si IV και C IV	91
5.5	.1.	Προσομοίωση του συνεχούς	91
5.5	.2.	Προσομοίωση των BELs	91
5.5	.3.	Προσομοίωση των BALs	92
5.6.	Σφ	άλματα	94
5.7.	Διο	ρθώσεις	94
Κεφάλο	uo 6.	Ανάλυση μετρήσεων	99
6.1.	Απ	οτελέσματα προσομοίωσης των 20 BALQSOs	99
6.1 βρί	1. ίσκοι	Σύγκριση των παραμέτρων των συνιστωσών Si IV και C IV, που νται στην ίδια V _{rad} από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής	118
6.2.	Απ	οτελέσματα μελέτης μεταβλητότητας στους 10 BALQSOs	
6.2	.1.	Μεταβλητότητα στις ακτινικές ταχύτητες των συνιστωσών	123
6.2	.2.	Μεταβλητότητα στα εύρη (FWHM) των συνιστωσών	124
6.2	.3.	Μεταβλητότητα στα οπτικά βάθη των συνιστωσών	125
Κεφάλα	αο 7.	Συζήτηση	135
7.1.	Συζ	ζήτηση επί των αποτελεσμάτων προσομοίωσης των 20 BALQSOs.	135
7.2. BALQ	Συα SOs.	ζήτηση επί των αποτελεσμάτων μελέτης της μεταβλητότητας	στους 10 140
7.2	.1.	Γενικές Παρατηρήσεις	140
7.2	.2.	Μεταβολές στις Ακτινικές Ταχύτητες των Συνιστωσών	141
7.2	.3.	Μεταβολές στα Εύρη (FWHM) των Συνιστωσών	141
7.2	.4.	Μεταβολές στα Οπτικά Βάθη των Συνιστωσών	142
7.3.	Мη	Ομοιογενής vs Ομαλούς και Ομοιογενούς Εκροής	145
Κεφάλα	uo 8.	Συμπεράσματα	147
8.1.	Εισ	αγωγή	147
8.2.	Συι	ιπεράσματα από τη μελέτη των 20 BALQSOs	148

Βιβλιογραφία				
Παράρτημα153				
8.4.	Μελλοντικό έργο			
8.3.	Συμπεράσματα από τη μελέτη μεταβλητότητας			

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς τη βοήθεια και συμπαράσταση πολλών ανθρώπων που βρέθηκαν στη ζωή μου και με βοήθησαν.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής επίβλεψης της διδακτορικής διατριβής Δρ Απόστολο Μαστιχιάδη, Καθηγητή Αστροφυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και τον Δρ. Νεκτάριο Βλαχάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Η παρουσία τους, οι παρατηρήσεις τους, οι υποδείξεις τους και οι επιστημονικές συζητήσεις που έκανα μαζί τους αποτέλεσαν πολύτιμη βοήθεια για την βελτίωση και περάτωση της εν λόγω διατριβής.

Ιδιαίτερες και θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον δάσκαλό μου και κύριο επιβλέποντα της παρούσας διατριβής Δρ. Εμμανουήλ Δανέζη, Επίκουρο Καθηγητή (νυν αφυπηρετήσας) του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών για τη συνεχή, επίπονη, υπομονετική και γεμάτη ενθάρρυνση επίβλεψη της επιστημονικής μου πορείας και καθοδήγησή του σε θέματα αστροφυσικής και μη.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τους φίλους και συναδέλφους Δρ. Ευαγγελία Λύρατζη και Δρ. Αντώνιο Αντωνίου για την πολύτιμη επιστημονική συμβολή τους στην παρούσα έρευνα αλλά και για την πολύτιμη συνεργασία τους και υποδείξεις τους επί επιστημονικών και μη θεμάτων. Θερμά ευχαριστώ τον φίλο και συνάδελφο Δρ. Δημήτριο Τζιμέα για την ιδιαίτερα σημαντική συνεισφορά του στη δημιουργία του υπολογιστικού προγράμματος επεξεργασίας φασματικών δεδομένων με βάση το οποίο πραγματοποιήθηκε η παρούσα διατριβή.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες αξίζουν στους φίλους και συνεργάτες Dr. Luka Popović, Ανώτερο Ερευνητή (Senior Researcher) του Αστεροσκοπείου του Βελιγραδίου και Dr. Milan Dimitrijević, Ερευνητή Καθηγητή (Research Professor) του Αστεροσκοπείου του Βελιγραδίου, Dr. Edi Bon, Αναπληρωτή Ερευνητή (Assistant Research Professor) του Αστεροσκοπείου του Βελιγραδίου, την Dr. Dragana Ilic, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του τομέα Αστρονομίας του τμήματος Μαθηματικών του Πανεπιστημίου του Βελιγραδίου, την Dr. Jelena Kovacevic-Dojcinovic και την Dr. Anđelka Kovačević για την ανταλλαγή απόψεων, τις πολύωρες συζητήσεις και τις πολύτιμες επιστημονικές συμβουλές τους, καθώς και για την κάθε είδους επιστημονική βοήθεια που απλόχερα μου παρείχαν.

Ευχαριστώ επίσης τους Dr. Jack W. Sulentic, Καθηγητή στο Τμήμα Φυσικής και Αστρονομίας του Πανεπιστημίου της Αλαμπάμα και στο Ινστιτούτο Αστροφυσικής της Ανδαλουσίας, και Dr. Daniel Proga, Καθηγητή του τμήματος Φυσικής και Αστρονομίας του Πανεπιστημίου της Νεβάδα, Λας Βέγκας για τις πολύτιμες συζητήσεις στο πεδίο της Αστροφυσικής αλλά και για το πρωτογενές υλικό της έρευνάς τους που μου παρείχαν.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον αείμνηστο κύριο Θεόδωρο Σπυρόπουλο (Ted Spyropoulos), την γυναίκα του Erica Spyropoulos και το Ίδρυμα Ted & Erica Spyropoulos Foundation για την πολύτιμη οικονομική τους ενίσχυση η οποία ήταν καταλυτική για την συμμετοχή μου σε Διεθνή Συνέδρια Αστροφυσικής τα οποία εμπλούτισαν την επιστημονική μου κατάρτιση και βοήθησαν στην περάτωση της παρούσας διατριβής. Επίσης ευχαριστώ τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας για την κάλυψη ενός μεγάλου μέρους των εξόδων συμμετοχής μου σε μια σειρά συνεδρίων και σχολείων που αφορούν τα θέματα της παρούσης μελέτης. Ευχαριστώ επίσης το Ίδρυμα Ευγενίδου, στο οποίο εργάζομαι, για τις πάσης φύσεως διευκολύνσεις που μου παρείχε κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στη Μητέρα μου Μαρία, τα αδέρφια μου Ρίτσα και Κώστα και τις οικογένειές τους όπως και στους στενούς μου φίλους Φώτη Ζαραβέλη, Πόπη Ζαραβέλη, Δημήτρη Βλάχο, Κώστα Σκόρδο, Χρήστο Σίσκο, Χρήστο Τσετσενέκο, Ηλία Κουτρούμπα, Δημήτρη Κουρνιάτη και Παναγιώτη Σταμάτη για την αμέριστη ηθική και ανθρώπινη συμπαράστασή τους.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στη σύζυγό μου Ελένη Μαρινάκου για την αμέριστη υπομονή και συμπαράσταση αλλά και την ψυχολογική υποστήριξη που επέδειξε, οι οποίες ήταν καταλυτικές για την περάτωση της παρούσας διατριβής αλλά και για την συνολική επιστημονική μου εξέλιξη.

Πρόλογος

Το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι: «Μελέτη των πλατιών γραμμών απορρόφησης των Si IV και C IV στα υπεριώδη φάσματα των Broad Absorption Line Quasars» και αποτελείται από οκτώ κεφάλαια.

Οι πλατιές γραμμές απορρόφησης (Broad Absorption Lines-BALs), που εμφανίζονται στα υπεριώδη μήκη κύματος, των quasars αποτελούν ένα ιδιαιτέρως αινιγματικό φαινόμενο, η ερμηνεία του οποίου παραμένει, για δεκαετίες, ένα ανοιχτό ερώτημα. Ο λόγος που το BAL φαινόμενο παραμένει ανοικτό έγκειται στην εμφάνιση μιας σειράς θεμελιακών αδυναμιών οι οποίες δυσχεραίνουν την συνεπή και ορθή ανάλυση και μελέτη των BALs.

Οι θεμελιώδεις αδυναμίες ανάλυσης και μελέτης των BALs είναι:

- 1. Στην περίπτωση των quasars και πιο συγκεκριμένα στους BAL quasars η κόκκινη πτέρυγα των BALs είναι αναμεμιγμένη, από μικρό έως μεγάλο βαθμό με την αντίστοιχη BEL σχηματίζοντας τύπου P-Cygni προφίλ. Αυτό έχει ως συνέπεια να μην είναι εύκολος ο διαχωρισμός των δύο φασματικών προφίλ επειδή τόσο οι BALs όσο και οι BELs αποτελούν το προϊόν σύνθεσης επιμέρους φασματικών συνιστωσών απορρόφησης και εκπομπής αντίστοιχα. Η αδυναμία καθορισμού του ακριβή και μοναδικά καθορισμένου αριθμού συνιστωσών των BALs και BELs προσδίδει στην ανεξάρτητη μελέτη των δύο προφίλ μεγάλη αβεβαιότητα. Συνεπώς, τα δύο είδη φασματικών γραμμών, BELs και BALs, και μάλιστα όταν σχηματίζουν τύπου P-Cygni προφίλ κρίνεται αναγκαίο να μελετώνται συγχρόνως, προκειμένου να γίνεται ο διαχωρισμός τους και η ορθή επεξεργασία τους.
- 2. Μέχρι πρότινος δεν ήταν εφικτός ο διαχωρισμός και η ανάλυση των BALs, γραμμών συντονισμού, όπως αυτές των Si IV και C IV, στον ακριβή και μοναδικώς καθορισμένο αριθμό συνιστωσών από τις οποίες αποτελούνται. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μελετώνται οι BALs ως μια ενιαία φασματική γραμμή εφόσον δεν υπήρχε η δυνατότητα ανάλυσης τους σε επιμέρους συνιστώσες. Ως παράδειγμα αναφέρεται η δουλειά των Wampler et al. (1993) οι οποίοι σημειώνουν ότι επειδή δεν υπάρχει μια μέθοδος η οποία να μπορεί να δίνει την καλύτερη δυνατή προσαρμογή (best fitting) μιας BAL μέσω πολλαπλών συνιστωσών, επιχειρείται η μοντελοποίηση αυτών (βλέπε § 4.3).
- 3. Τα δύο μέλη μιας διπλέτας συντονισμού όπως του Si IV (λλ 1393.755, 1402.77 Å) και του C IV (λλ 1548.187, 1550.772 Å) βρίσκονται πολύ κοντά στο χώρο των μηκών κύματος με αποτέλεσμα οι δύο συνιστώσες να είναι αναμεμιγμένες (blend). Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια να μην είναι δυνατός ο διαχωρισμός των μελών μιας διπλέτας συντονισμού με αποτέλεσμα αυτές να μελετώνται ως μία ενιαία φασματική γραμμή (Laor et al. 1994, Martziani et al. 1996, 2010, Sulentic et al. 2007, 2017, Negrete et al. 2012, 2014). Έτσι, οι μέθοδοι fitting περιορίζονται στη μελέτη μόνο των στενών γραμμών απορρόφησης (NALs) των quasars στις οποίες οι γραμμές συντονισμού είναι διακριτές. Στην περίπτωση των BALs οι διάφορες μέθοδοι δεν μπορούν να διαχωρίσουν τις βALs στις συνιστώσες από τις οποίες αποτελούνται. Οι

εν λόγω αδυναμίες δεν επιτρέπουν την μελέτη των πυκνωμάτων-νεφών τα οποία δημιουργούν τις επιμέρους συνιστώσες οι οποίες σχηματίζουν τις BALs.

- 4. Όπως είναι κατανοητό η αδυναμία διαχωρισμού των δύο μελών μιας διπλέτας συντονισμού έχει ως συνέπεια την αδυναμία ανάλυσης μίας BAL στις συνιστώσες από τις οποίες αποτελείται. Αν υποθέσουμε ότι η ανάλυση μιας BAL σε επιμέρους συνιστώσες είναι εφικτή τότε προκύπτει ένα ακόμη πρόβλημα μεγίστης σημασίας. Το πρόβλημα έγκειται στον προσδιορισμό του ακριβή αριθμού συνιστωσών από τις οποίες μία BAL αποτελείται και στη μοναδικότητα της τελικής καλύτερης δυνατής προσαρμογής. Η απροσδιοριστία αυτού του παράγοντα δημιουργούσε μια τελική αδυναμία της εξασφάλισης του μονοσήμαντου των τιμών των παραμέτρων οι οποίες θα αντιστοιχούσαν σε κάθε παρεμβαλλόμενο πύκνωμα-νέφος στη γραμμή παρατήρησης. Όπως είναι φανερό το μονοσήμαντο τόσο του αριθμού των συνιστωσών των BALs όσο και του υπολογισμό των αντίστοιχων φυσικών κριτηρίων τα οποία δεν υπήρχαν.
- 5. Όλες οι προηγούμενες αδυναμίες δεν επιτρέπουν τον καθορισμό του μηχανισμού πρόκλησης της έντονης μεταβλητότητας των BALs συναρτήσει του χρόνου. Ο λόγος είναι ότι η παρατηρούμενη μεταβλητότητα οφείλεται σε μεταβολές των φυσικών παραμέτρων των ανεξάρτητων νεφών τα οποία συνεισφέρουν στη δημιουργία των BALs, οι οποίες δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστούν. Για παράδειγμα ένα καίριο ερώτημα είναι αν η μεταβλητότητα των BALs οφείλεται σε (φαινόμενες) εγκάρσιες κινήσεις νεφών εντός της γραμμής παρατήρησης ή σε άλλα αίτια όπως μεταβολές στον βαθμό ιονισμού του αερίου.
- 6. Τέλος η μέχρι σήμερα αδυναμία απάντησης σε όλα τα προηγούμενα καθιστούσε αδύνατη την εξαγωγή στατιστικών συμπερασμάτων τα οποία θα αφορούσαν τις τιμές των παραμέτρων των νεφών, στο περιβάλλον των quasars, τα οποία συνεισφέρουν στην δημιουργία των BAL περιγραμμάτων.

Οι ανωτέρω αδυναμίες εγείρουν μια σειρά ερωτημάτων, τα οποία παραμένουν αναπάντητα επί σειρά δεκαετιών. Σε γενικές γραμμές τα ανοιχτά ερωτήματα έχουν να κάνουν με την δομή, την φύση και την προέλευση των BALs τα οποία αντικατοπτρίζουν την δομή τις φυσικές συνθήκες και την γεωμετρία της περιοχής που δημιουργεί τις εν λόγω φασματικές γραμμές. Για δεκαετίες, δεν έχει καταστεί εφικτή η ακριβής προσομοίωση όλων των διαφορετικών BAL προφίλ μέσω ενός μοντέλου, εξαιτίας του μεγάλου εύρους τους αλλά και τις ποικιλομορφίας των προφίλ τους.

Τα ανοιχτά ερωτήματα στα οποία καλείται να απαντήσει η εν λόγω διατριβή είναι τα εξής:

- Είναι δυνατός ο διαχωρισμός των BALs από τις αντίστοιχες BELs, με τις οποίες δημιουργούν τύπου P-Cygni προφίλ, και η ανεξάρτητη μελέτη των δύο διαφορετικών φασματικών προφίλ;
- 2. Μπορεί να επιβεβαιωθεί πρακτικά, μέσω μιας πειραματικά αποδεκτής φασματοσκοπικής ανάλυσης, ότι οι BALs αποτελούνται από μια σύνθεση συνιστωσών απορρόφησης προερχόμενων από αντίστοιχα ανεξάρτητα νέφη απορρόφησης, στην γραμμή παρατήρησης, εντός της εκροής;
- 3. Επειδή τα λαμβανόμενα από τους δορυφόρους φάσματα αποτελούν ένα σύνολο σημείων και όχι μια συνεχή καμπύλη, είναι δυνατόν για κάθε BAL να

προσδιοριστούν επακριβώς οι «συναρτήσεις (κατανομές) γραμμών» κάθε συνιστώσας της BAL (συναρτήσεις παρεμβολής των σημείων κάθε φασματικής συνιστώσας, οι οποίες συμπίπτουν με κάποια κατανομή) και να μην μελετάται γενικά το προφίλ της; Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τελική συνάρτηση παρεμβολής η οποία περιγράφει το θεωρητικό περίγραμμα της BAL; Σημειώνεται ότι, με βάση την επίλυση της εξίσωσης διάδοσης ακτινοβολίας μέσω πολλαπλών νεφών απορρόφησης, το περίγραμμα των BALs δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθεί μέσω της άθροισης των συναρτήσεων γραμμών των συνιστωσών από τις οποίες αποτελούνται, αλλά μέσω του γινομένου τους.

- 4. Είναι δυνατή η ανεξάρτητη μελέτη κάθε μέλους της διπλέτας του CIV και του Si IV και όχι η μελέτη τους ως μια ενιαία φασματική γραμμή όπως γίνεται μέχρι σήμερα;
- 5. Στην περίπτωση κατά την οποία δημιουργούνται σε μια φασματική περιοχή περισσότερες της μιας BAL ενός ιόντος είναι δυνατός ο υπολογισμός ενός σύνθετου πολυωνύμου παρεμβολής το οποίο μπορεί να περιγράφει ολόκληρη αυτή την φασματική περιοχή;
- 6. Είναι δυνατή η μελέτη μιας φασματικής περιοχής στην οποία εμφανίζονται BALs και BELs περισσοτέρων ιόντων;
- 7. Είναι δυνατόν να διασφαλιστεί μονοσήμαντα ορισμένα, ο αριθμός των συνιστωσών οι οποίες δημιουργούν τις BALs, και αντίστοιχα να υπολογιστούν μονοσήμαντα οι τιμές των φυσικών παραμέτρων των νεφών που δημιουργούν τις φασματικές συνιστώσες απορρόφησης των BALs;
- 8. Ποιο είναι το φυσικό μοντέλο της BAL περιοχής; Είναι οι BALs το προϊόν ενός ομαλού και ομοιογενούς ανέμου ή νεφών απορρόφησης τα οποία δημιουργούνται στο εσωτερικό μιας δυναμικής και ασταθούς εκροής;
- 9. Ποια είναι η δομή των νεφών απορρόφησης;
- 10. Ποιες οι φυσικές συνθήκες των νεφών απορρόφησης;
- 11. Ποιος είναι ο μηχανισμός σχηματισμού των BALs;
- 12. Που οφείλεται η μεταβλητότητα των BALs; Ποιος είναι ο υπεύθυνος μηχανισμός πρόκλησης της μεταβλητότητας;
- 13. Εφόσον δοθεί απάντηση στα προηγούμενα ερωτήματα-προβλήματα είναι δυνατόν να δοθούν γενικότερα στατιστικά συμπεράσματα για την δομή και τις τιμές των παραμέτρων οι οποίες προκύπτουν από την φασματική ανάλυση; Τα γενικότερα στατιστικά συμπεράσματα αποτελούν και ένα κριτήριο για την ορθότητα μελλοντικών προσομοιώσεων.

Προκειμένου να απαντηθούν αυτά τα ερωτήματα, στην εν λόγω εργασία γίνεται η μελέτη των BALs Si IV και C IV στην περίπτωση 20 BALQSOs όπως επίσης και η μελέτη της μεταβλητότητας των BALs των εν λόγω ιόντων στην περίπτωση 10 εκ των 20 BALQSOs. Σημειώνεται ότι η μεταβλητότητα των BALs Si IV και C IV πραγματοποιείται μεταξύ δύο διαφορετικών εποχών και η χρονική διαφορά μεταξύ των δύο παρατηρήσεων κυμαίνεται από 6 έως 13 έτη.

Στο πρώτο κεφάλαιο, της διδακτορικής διατριβής, γίνεται εισαγωγή στους Broad Absorption Line Quasars (BALQSOs), μιας υποκατηγορίας των quasars, οι οποίοι στα φάσματά τους φέρουν πλατιές γραμμές απορρόφησης στα υπεριώδη και οπτικά μήκη κύματος. Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται επίσης τα χαρακτηριστικά των πλατιών γραμμών απορρόφησης (Broad Absorption Lines-BALs) και η περιοχή εντός της οποίας παράγονται οι εν λόγω φασματικές γραμμές. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η πλήρης περιγραφή των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στις εσωτερικές περιοχές των BAL quasars. Πιο συγκεκριμένα γίνεται εκτενής αναφορά στις ισχυρότατες εκροές πλάσματος οι οποίες πηγάζουν από τους δίσκους προσαύξησης που περιβάλουν τις υπερμεγέθεις μελανές οπές οι οποίες εδράζονται στα κέντρα αυτών των αστρονομικών αντικειμένων. Παρουσιάζεται η ιστορική αναδρομή της μελέτης των εκροών πλάσματος η οποία έχει τις ρίζες της στις εκροές των θερμών αστέρων και καταλήγει στις τρέχουσες απόψεις περί των εκροών των quasars. Συγχρόνως παρουσιάζονται τα δύο αντιμαχόμενα μοντέλα ερμηνείας της δομής των BAL εκροών και της προέλευσης των BALs. Τέλος, γίνεται η περιγραφή της μελέτη της μεταβλητότητας των BALs Si IV και C IV.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα ατομικά χαρακτηριστικά του τριπλά ιονισμένου πυριτίου (Si IV) και του τριπλά ιονισμένου άνθρακα (C IV) όπως επίσης και τα χαρακτηριστικά των γραμμών συντονισμού multiplet 1 των εν λόγω ιόντων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος μελέτης των BALs Si IV και C IV. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται το προτεινόμενο φυσικό μοντέλο της BAL περιοχής, το μαθηματικό μοντέλο μέσω του οποίου γίνεται η μελέτη των BALs Si IV και C IV και τα προτεινόμενα κριτήρια προσομοίωσης των BALs Si IV και C IV, μέσω πολλαπλών συνιστωσών, τα οποία διασφαλίζουν τόσο την μοναδικότητα των προσομοιώσεων όσο και την μοναδικότητα των .τιμών των υπολογιζόμενων φυσικών παραμέτρων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται τα παρατηρησιακά δεδομένα, τα κριτήρια επιλογής του δείγματος των υπό μελέτη 20 BALQSOs, η επεξεργασία και προετοιμασία των φασμάτων και η διαδικασία προσομοίωσης των BALs και BELs Si IV και C IV.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των BALs Si IV και C IV σε πολλαπλές συνιστώσες, στο δείγμα 20 γαλαξιών όπως επίσης και τα αποτελέσματα της μελέτης της μεταβλητότητας των BALs Si IV και C IV σε 10 εξ αυτών.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται συζήτηση επί των αποτελεσμάτων που προέκυψαν τόσο από την μελέτη των BALs Si IV και C IV στην περίπτωση των 20 BALQSOs όσο και από την μελέτη της μεταβλητότητας των 10 BALQSOs μεταξύ δύο διαφορετικών περιόδων.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη του δείγματος των 20 BALQSOs.

Summary

1. Introduction

Broad absorption line QSOs (BALQSOs) are a subtype of radio-quiet QSOs defined by the presence of deep, broad and high velocity absorption lines that are usually blueshifted with respect to the corresponding emission lines in the UV region of the electromagnetic spectrum (though there are cases that redshifted absorption has been observed, see Hall et al. 2013). About 20%-30% of the detected quasar population exhibits broad absorption line (BAL) troughs blueshifted with respect to the corresponding emission lines in their rest frame UV spectra (Ganguly & Brotherton 2008; Knigge et al. 2008). BALs are usually observed in high ionization species such as N V, Ly α , C IV, Si IV and are sometimes detected in lower ionization species like Mg II or Al III.

BALs exhibit a wide range of characteristics in terms of width, velocity shift, strength of absorption, level of ionization and structure of absorption profile (Turnshek 1988). An absorption line can be considered a BAL when it is characterized by velocity width > 2000 km/s at depths > 10% below the continuum (Weymann et al. 1991). For BALs, a representative line width is ~ 10000 km/s (Weymann et al. 1985; Hamann 2000). Maximum outflow velocities normally lie in the range 10000-30000 km/s (Turnshek 1988), or more (Foltz et al. 1983).

In terms of structure, BAL troughs display a great diversity (see Turnshek 1988; Korista et al. 1993). On the one hand we encounter smooth absorption troughs that exhibit P-Cygni type profiles which set in near zero velocity. On the other hand, there are cases where the absorption is very broken up. There are also cases in which multiple troughs, which form near zero velocity, have been observed. Finally, there are BALQSOs that exhibit detached troughs from the corresponding emission. These troughs do not begin to form until the outflow velocity reaches a value of 3000-5000 km/s (Turnshek 1988).

BALs identify high velocity outflows launched from a rotating accretion disc that surrounds and feeds the central supermassive black hole ($\sim 10^{8-9} M_{\odot}$). The properties of the BAL material in phase space are uncertain and their origin remains an open question. On the one hand we have the smooth wind models (Scargle et al. 1970; Shlosman & Vitello 1993; Murray et al. 1995; Fukumura et al. 2018), according to which BAL troughs are the product of a smooth continuous flow. On the other hand we encounter models which assume that BALs are due to a flow of many individual substructures in the wind called density enhancements or clumps or clouds, indicating that accretion disc outflows are clumpy (McKee & Tarter 1975; Turnshek 1984; Lyratzi et al. 2009, 2010, 2011; Hamann et al. 2013; Takeuchi et al. 2013; Capellupo et al. 2012, 2014; Misawa et al. 2014, 2016; Stathopoulos et al. 2015; Waters & Proga 2016).

Besides BALs, BALQSOs also exhibit Broad Emission Lines (BELs) with widths of the order of 10,000 km/s (see Fig. 1.1). BALs and BELs form P-Cygni type profiles with complex characteristics. This fact makes the study of BALs and BELs considerably complex. The majority of the scientific community, working on quasars, deals with the study of BELs as they were the first to be discovered, they are an essential component of AGN (Active Galactic Nuclei) and provide useful information about the mass of the central black hole. However, the study of BELs is problematic due to the following reasons: a) BEL profiles arise from the synthesis of independent emission lines formed in emitting clouds located in the BELR (Broad Emission Line Region), b) BELs are blended with complex and very broad absorption troughs forming P-Cygni type profiles. As a result, it is very difficult to deblend the blue wing of a BEL from the red wing of a BAL. Therefore, studying only one type of spectral lines, either emission or absorption is unreliable. Both BELs and BALs should be analyzed and studied simultaneously.

The first attempts to model quasar winds and BAL profiles were motivated by analogy with winds from hot stars (Proga 2007). The so-called standard model of hot star winds (see Lucy & Solomon 1970; Castor, Abbott & Klein 1975; Friend & Castor 1983; Abbott & Lucy 1985; Friend & Abbott 1986; Pauldrach et al. 1986; Puls 1987; Lucy & Abbott 1993) assumes that the wind is stationary, homogeneous (e.g. no shocks or clumps), spherically symmetric and driven by radiation pressure acting on resonance lines. As in the case of hot stars, the first wind models of quasars assumed that the powerful outflows were smooth and homogeneous (e.g. Scargle et al. 1970; Drew & Boksenberg 1983; Shlosman & Vitello 1993; Murray et al. 1995; Higginbottom et al. 2013; Matthews et al. 2016). It should be noted that smooth wind models tend to describe or predict only smooth P-Cygni type profiles. Even theoretical wind models which incorporate the effect of clumping cannot describe all different BAL types but only predict smooth P-Cygni profiles (Matthews et al. 2016). However, there are strong observational and theoretical evidence indicating that the outflows of hot stars (see conference proceedings "Clumping in Hot Star Winds" by Hamann et al. 2008, and references therein) and quasars are far from being smooth and homogeneous.

An alternative to smooth and homogeneous quasar wind is the clumpy wind model. There are several arguments favoring the clumpy wind model over the smooth outflow. The diversity and complexity of BAL profiles, as well as their variability, imply that BALQSO winds are far from being smooth and homogeneous. The main idea is that quasar winds are pervaded by a large number of multiscale structures (clumps, clouds), whose origin is probably some kind of radiative instability (Takeuchi et al. 2013, 2014; Moscibrodzka & Proga 2013; Proga et al. 2014; Proga & Waters 2015; Waters & Proga 2016; Kobayashi et al. 2018). From an observational point of view Misawa et al. (2014, 2016) by observing multiple sight lines, with the aid of strong gravitational lensing, managed to resolve the clumpy structure of the outflow winds in individual quasars. Hamann et al. (2011) identified five high-velocity outflow Narrow Absorption Lines (NALs) in SDSS J212329.46-005052.9 which require five distinct clumpy structures of the outflow with similar physical conditions, characteristic sizes and kinematics. Lu & Lin (2018) managed to resolve the Si IV BAL of J002710.06-094435.3 into multiple (at least four) NALs and to identify the same number of NALs in the corresponding CIV BAL. They concluded that both the C IV and Si IV BALs originate from the same clumpy substructures of the outflow. The clumpy outflow scenario is also strengthened by variability studies of BAL profiles (see e.g. Gibson et al. 2008; Capellupo et al. 2011, 2012, 2014; Hamann 2008; Misawa et al. 2007; Hall et al. 2011; Stathopoulos et al. 2017). Finally, the clumpy outflow offers a possible solution to the so-called "overionization problem" in quasar outflows (e.g. Junkkarinen et al. 1983; Weymann et al. 1985; Hamann et al. 2013).

1.1. Broad absorption line variability

Quasar outflows exhibit variability on short time scales (days) as well as on longer time scales (years to decades). The mechanisms invoked to explain BAL variability are the following: (1a) changes in the ionization state of the outflowing gas caused by fluctuations in the far-UV continuum flux (Hamann et al. 2011; He et al. 2017; Lu, Lin & Qin 2018), (1b) changes of gas ionization caused by the evolving gas density due to e.g. thermal instability (Waters et al. 2017) and (2) transverse motion of the absorbing cloud(s) relative to the line of sight (Gabel et al. 2003; Lundgren et al. 2007; Hall et al. 2007; Capellupo et al. 2011, 2012; Vivek et al. 2012).

The relation between continuum and BAL variability is different for each case. For example, in case (1a) continuum and BAL variability are highly correlated. As different parts of the outflowing gas face the same ionizing continuum, different absorption components exhibit coordinated variability. Filiz Ak et al. (2012, 2013) and Wildy et al. (2014) found that different components of the same BAL or Si IV and C IV BAL troughs, in one object, vary in concert (all strengthening or weakening). This behavior indicates that ionization change due to a variable ionizing continuum is important. On the other hand, in cases (1b) and (2) continuum and BAL variability are independent. In case (1b) ionization level changes can create non-coordinated variations between absorption components (see Waters et al. 2017, for the thermal instability case) within the same trough or between the troughs of different ions. Finally, in case (2) the transverse motion of clouds across the line of sight can cause non-coordinated variability i) between absorption components within the same BAL (Capellupo et al. 2012) or ii) between Si IV and C IV absorption components over corresponding velocities, within the same object.

Usually BAL variability studies are performed through EW measurements of the whole BAL trough (e.g. Lundgren et al. 2007; Gibson et al. 2010; Welling et al. 2014; Wildy et al. 2014; He et al. 2014) or by measuring variability of selected portions of BAL troughs (e.g. Gibson et al. 2008; Capellupo et al. 2011, 2012, 2013; Filiz Ak et al. 2013; He et al. 2015). However, various studies define variable regions in different ways. For example, Filiz Ak et al. (2013) detect variable regions wider than \approx 275 km/s, He et al. (2015) detect variable regions wider than \approx 774 km/s while Gibson et al. (2008); Capellupo et al. (2011, 2012, 2013) detect variable regions wider than \approx 1200 km/s.

BAL variability studies concentrating on the variations of individual components are the ones by Vilkoviskij & Irwin (2001) and Lu & Lin (2018). Vilkoviskij & Irwin (2001) observed a rise in the depths of absorption features in the BALQSO Q13031308. They attributed depth variability in increasing amounts of absorbing matter and/or absorbing ions along the line of sight probably due to spectral luminosity variation of the central object. Lu & Lin (2018) observed coordinated variability of all four Si IV narrow components of Si IV BAL in the BALQSO J002710.06-094435.3. They attributed this variability to global changes in the ionization condition of the absorbing gas.

The current thesis is based on the idea that quasar winds are clumpy. Therefore, BALs can be interpreted as the synthesis of a series of absorption components formed in independent absorbing clouds in the line of sight. As a result, the main quest in BAL studies is their analysis to the individual components they consist of and the investigation of these components. Studying each individual component one can probe the physical conditions, kinematics and variability of each individual absorbing cloud in the line of sight.

In this thesis we use: (a) the model of Danezis et al. (2003, 2007); Lyratzi et al. (2007) (see §4.3), which can analyse BALs to individual components, (b) the fitting criteria and physical model of Stathopoulos et al. (2015, 2019) (see § 4.2 and 4.3) which guarantee that the number of components each Si IV and C IV BAL is analyzed into is uniquely determined and (c) ASTA software (Tzimeas 2019, see §4.4) which is based on the model of Danezis et al. (2003, 2007); Lyratzi et al. (2007) and the fitting criteria of Stathopoulos et al. (2015, 2019), in order to find the unique number of clouds forming Si IV and C IV BALs in selected 20 quasars (§5 and §6). In order to test the distinction and independence of absorption components, in §6.2 we investigate the time variability of radial velocities (V_{rad}), FWHMs and optical depths τ_0 of each individual component, between two different epochs. Finally, in §7 we discuss the findings derived from our analysis while in §8 we provide our conclusions concerning the study of our sample of 20 quasars

2. Problems in the study of BALs

Though the clumpy wind model, of quasar outflows, has strong theoretical basis, it has not been confirmed observationally by a spectroscopic method. There are very few studies which try to fit and analyze BALs to the components they consist of (e.g. Lu & Lin, 2018). However, their results present a series of problems such as the following:

- 1. In BALQSOs, the red wing of BALs is usually blended with the corresponding BELs producing P-Cygni type profiles. Consequently, it is extremely difficult to deblend the two different profiles because both are products of individual components. Especially, in the case of doublets, debledning BALs form BELs becomes more difficult. The inability to determine the unique number of components each BAL trough consists of can lead to wrong estimations in the BEL profile. Therefore, both profiles should be studied simultaneously so that their profiles can be analyzed consistently.
- 2. Due to the fact that it was not possible to analyze BALs to the components they consist of, studies were focusing on fitting or modeling (predicting) the whole BAL profile. For example, Wampler et al. (1993) state that due to the lack of a method able to provide the best of a BAL using multiple components we try to model them theoretically (see §4.3).
- 3. Both members of a resonance doublet, such as Si IV and C IV are very close in velocity space, thus overlapping. Due to their inability to deblend them, many researchers study resonance doublets as singlets (Laor et al. 1994, Martziani et al. 1996, 2010, Sulentic et al. 2007, 2017, Negrete et al. 2012, 2014). Consequently, fitting methods are restricted in the study of Narrow Absorption Lines for which the members of a doublet are resolved. Due to the above reasons it has not been possible to study the individual absorbers in the line of sight, consistently.
- 4. Assuming a multicomponent analysis of BALs is possible, we encounter a major issue. Which is the true number of components each BAL consists of? Can the

number of components each BAL is analyzed into be uniquely determined? If the number of components is not uniquely determined, then the values of the physical and kinematical parameters of individual absorbers are not uniquely determined either. In order to accurately and uniquely determine the number of components and the values of the calculated parameters we need a series of physical criteria which guarantee the above.

- 5. All the above problems make determination of the mechanism responsible for BAL variability extremely difficult. The observed BAL variability is due to changes in the physical parameters of clouds. If we cannot study each cloud independently then it is not possible to determine the reasons causing the observed variability. For example, an important issue is whether BAL variability is due to cloud motions across the line of sight or due to changes in the ionization state of the absorbers.
- 6. Finally, due to the above difficulties it was not possible to reach to statistical conclusions concerning the values of the physical and kinematical parameters of absorbing clouds in the line of sight.

All the above raise a series of questions which remain open for decades. In general, the open questions concerning BALs have to do with the structure, the nature and origin of BALs which reflect the structure, the kinematics, the physical conditions and the geometry of the regions which gives rise to BALs. The great diversity and complexity of BAL profiles has been the major issue that no model could address until recently.

3. Open questions

In order to tackle the problems mentioned above we need to analyze BALs to the components they consist of and thus study each absorbing cloud in the line of sight. In the current thesis using GR model (Danezis et al. 2003, 2007; Lyratzi et al. 2007) and the fitting criteria of Stathopoulos et al. (2015, 2019) we analyze, for the first time, the BALs of Si IV and C IV to the individual components they consist of in the case of 20 BALQSOs. In order to achieve this, we used ASTA software (Tzimeas et al. 2019) which incorporates the theory of GR model. ASTA software was developed by the Astrophysical Spectroscopy Team of Athens¹ under the aid of Special Account for Research Grants of the National and Kapodistrian University of Athens. The open questions that the current thesis is trying to answer are:

- 1. Is it possible to deblend BALs from the corresponding BELs and study each profile independently?
- 2. Is it possible to analyze BALs to the individual components they consist of through a spectroscopic method which assumes that components are formed into absorbing clouds in the line of sight?
- 3. Is it possible to determine the line function of every component that contributes to the formation of a BAL? If yes, is it then possible to determine the final function which when interpolated will provide the best fit of the whole BAL profile?

¹ <u>http://www.spectroscopyteam.edu.gr/</u>

- 4. Is it possible to deblend the members of resonance doublets such as Si IV and C IV and not to study them as singlets?
- 5. Is it possible to fit the whole absorption profile of a spectral region exhibiting more than one BALs of the same ion?
- 6. Is it possible to fit a spectral region consisting of BALs and BELs of different ions?
- 7. Can the number of components that each BAL consists of be uniquely determined? Can the values of the physical parameters of components be uniquely determined?
- 8. Which is the physical model of the BAL region? Are BALs the product of a smooth and homogeneous outflow or are they the product of absorbing clouds forming in the dynamic and unstable environment of the outflow?
- 9. Which is the structure of absorbing clouds?
- 10. Which are the physical conditions of absorbing clouds?
- 11. Which the mechanism of BAL formation?
- 12. Which is the responsible mechanism causing BAL variability?
- 13. Which are the general conclusions about Si IV and C IV BALs if a sample of BALQSOs is studied?

4. Method of analysis

4.1. Physical model

In a series of papers, Bottorff et al. (2000); Bottorff & Ferland (2000, 2002) proposed that the line widths produced by BELR (Broad Emission Line Region) clouds are wider than their thermal widths (For Si IV the thermal width in a 10^4 K gas is FWHM ~4 km/s and for a gas of 10^5 K, FWHM ~12 km/s. For C IV, these values are about 6 km/s and 20 km/s respectively.) because of microturbulence. They showed that microturbulent velocities can range from 200 km/s up to 103 km/s. Furthermore, Bottorff & Ferland (2001) proposed that each BELR cloud is a collection of overlapping constant density clumps. Finally, Lyratzi et al. 2009, using the model of Danezis et al. 2003, 2007; Lyratzi et al. 2007 showed that, in individual quasars, Ly_ and C IV BALs are the product of discrete components that are very close in velocity space and overlap.

Based on the previous studies, in Stathopoulos et al. (2015) we proposed a physical structure for the BAL region of quasars as well as a mechanism for the formation of Si IV and C IV BALs. According to the proposed physical model, BALs are complexes of narrow absorption components produced by density enhancements, within the outflow, which we call clouds. Clouds are considered as clusters of subunits called clumps (clumps-regions II, Figure 1 in Stathopoulos et al. 2015 or Fig. 4.1 in this thesis). From this point forward, we will always refer to the larger and more distinct structures as "clouds" (Regions I, Fig. 1, in Stathopoulos et al. 2015 or Fig. 4.1 in this thesis) while we will refer to the smaller structures as "clumps". According to Stathopoulos et al. (2015) each "clump" is responsible for the formation of absorption lines the width of which depends on thermal and microturbulent motions of ions inside the clump. The synthesis of all

these narrow lines, produce by clumps that are very close in velocity space and overlap, produce a broad component corresponding to a cloud. As a result, the relatively broad components we use in our fits correspond to clouds. The synthesis of the lines, produced by clouds, forms the broad absorption troughs known as BALs.

Furthermore, in Stathopoulos et al. (2015) we proposed that Si IV and C IV originate in the same clumpy clouds which have similar locations, kinematic structure and physical conditions. As a result, we proposed that Si IV and C IV BALs consist of the same number of components and in Stathopoulos et al. (2015, 2017) we fitted Si IV and C IV BALs with the same number of components in the case of four different BALQSOs. In Stathopoulos et al. (2019) we applied our method, successfully, in two epoch spectra of ten BALQSOs in order to investigate Si IV and C IV BAL variability. A confirmation to our proposition is provided by the findings of Lu& Lin (2018) who identified four different kinematic components in Si IV and C IV BALs of J002710.06-094435.3.

We note that our use of the "cloud"-terminology is shorthand for some form of modulation in density within the flow, along the line-of-sight to the continuum source. Therefore, the so-called clouds are not pre-existing structures accelerated by radiation pressure but are structures formed in the outflow as described by Takeuchi et al. 2013, 2014; Moscibrodzka & Proga 2013; Proga et al. 2014; Proga & Waters 2015; Waters & Proga 2016; Kobayashi et al. 2018 who predict that BALQSO outflows are clumpy.

A similar structure to ours has been proposed by many researchers. Sako et al. (2001) claim that the observed velocity widths of absorption lines in the X-ray spectrum of IRAS 13349+2438 may be due to a superposition of multiple, discrete absorption components which are optically thin, and are unresolved. Such cases have also been observed in UV absorption lines of Seyfert 1 galaxies (Crenshaw et al. 1999 and references therein), some of which show as many as 7 distinct, kinematic components (e.g., Mrk 509 Kriss et al. 2000). It should be noted, that the physical model we described above is confirmed, observationally, by the works of Misawa et al. (2016) and Lu& Lin (2018). Misawa et al. (2016) by observing multiple sight lines of the lensed quasar SDSS J1029+2623 resolved the clumpy structure of the outflow. They concluded that narrow absorbers and broader proximity absorption lines (PALs) consist of a number of small clumpy clouds. Furthermore, Lu& Lin (2018) managed to resolve the Si IV BAL of J002710.06-094435.3 into multiple (at least four) NALs and to identify the same number of NALs in the corresponding C IV BAL. They concluded that both the C IV and Si IV BALs originate from the same clumpy substructures of the outflow.

4.2. Mathematical expression of the model

The model of Danezis et al. (2003a, 2007 and 2009) and Lyratzi et al. (2007, 2009) assumes a source of continuum radiation which, in the line of sight, is intercepted by emitting and absorbing clouds. The clouds, for modeling reasons are assumed to be spherically symmetric around their own centers. The observed BALs/BELs are the synthesis of absorption/emission components produced by these clouds. So, in order to conclude to a mathematical function, that can simulate the complex BAL/BEL profiles produced by clouds, Danezis et al. (2003) solved the radiative transfer equation for such

a complex plasma region. The final equation derived by the solution of radiative transfer is (see Eq. 4.1.):

$$F(\lambda)_{\text{final}} = \left[F_0(\lambda)\prod_i \exp\{-L_i\xi_i\} + \sum_j S_{\lambda_{ej}}(1 - \exp\{-L_{ej}\xi_{ej}\})\right]\prod_g \exp\{-L_g\xi_g\}$$

where

i is the number of absorbing clouds in the line-of-sight,

j is the number of emitting clouds in the line-of-sight,

g is the number of additional absorbing clouds that may cover the i absorbing clouds as well as the j emitting clouds,

 $F_0(\lambda)$ is the initial flux,

 $exp\{-L_i\xi_i\}$ is the function that describes an absorption component, formed in an absorbing cloud in the line of sight, that contributes to the formation of a complex absorption profile,

 $\prod_i exp\{-L_i\xi_i\}$ is the factor that describes the synthesis of absorption components produced by i clouds,

 $S_{\lambda_{ej}}(1 - \exp\{-L_{ej}\xi_{ej}\})$ is the function that describes an emission component, formed in an emitting cloud in the line of sight, that contributes to the formation of a complex emission profile,

 $\sum_j S_{\lambda_{ej}} (1 - \exp\{-L_{ej}\xi_{ej}\})$ is the factor that describes the synthesis of emission components produced by j clouds in the line of sight; this function describes the complex emission profile, which is composed of j emission components,

 $\prod_g \exp\{-L_g\xi_g\}$ is the factor that describes the synthesis of absorption components produced by absorbing clouds that may obscure both i absorbing and j emitting clouds in the line of sight,

 L_i , L_{ej} , L_g are the distribution functions of the absorption coefficients $k_{\lambda i}$, $k_{\lambda ej}$, $k_{\lambda g}$,

 $k_{\lambda i}$ is the absorption coefficient of the i^{th} cloud in the line of sight,

 $k_{\lambda ej}$ is the absorption coefficient of the j^{th} emission cloud in the line of sight,

 $k_{\lambda g}$, is the absorption coefficient of the additional absorbing clouds that may cover the i and j clouds in the line of sight,

 ξ : is the optical depth (τ_0) at the center of the spectral line,

 $S_{\lambda ej}$ is the source function, which is constant during one observation.

We note that Danezis et al. (2003, 2007) and Lyratzi et al. (2007) parameterized the optical depth profile ($\tau \equiv L\xi$) of an absorption/emission component, with the following distributions: Lorentz, Gauss, Voigt, Rotation (Danezis et al. 2003), Gauss-Rotation (Danezis et al. 2007, Lyratzi et al. 2007). They also showed that if, for example, the optical depth profile follows a Gaussian distribution then the line profile $e^{-\tau}$ is also Gaussian.

4.2.1. The case of resonance lines

As previously mentioned, Eq. 4.1 is the final function which can provide the best fit to a complex spectral line consisting of individual components. In the case of complex

spectral lines, of ions such as Si IV, C IV, and N V, their profiles are the synthesis of doublets. As a result, the task of achieving the best fit becomes more complicated. In the case of BALs and BELs in quasars, and DACs in hot stars, resonance doublets are blended giving rise to complex absorption and emission profiles.

In order to simulate the complex profiles of resonance doublets, such as Si IV and C IV, during the fitting process we use Eq. 4.1 independently for every member of a doublet. For example, in the case of C IV $\lambda\lambda$ 1548.187, 1550.772 Å, we apply Eq. 4.1 twice, once for the 1548.187 Å (blue) and once for the 1550.772 Å (red) components of the doublet. By applying Eq. 4.1 twice we get two sets of lines. The first one provides the synthesis of all the blue components of C IV doublet (Fig. 6.1), while the second one provides the synthesis of all the red components of C IV doublet (see Fig. 6.1). Having these two sets of lines, we then synthesize them to get the best fit. The same applies to Si IV doublet.

4.3. Fitting criteria

Previous studies (Gibson et al. 2009, 2010; Capellupo et al. 2011, 2012; Filiz Ak et al. 2014) have shown that C IV BALs are not always accompanied by Si IV BALs. Due to different ionization energy levels of Si IV and C IV, an absorbing gas may not have dense enough regions to produce Si IV absorption lines. Therefore, our study focuses on BAL quasars that present both C IV and Si IV BALs over corresponding velocity ranges.

In the case of quasars, we assume that the components of Si IV and C IV BALs follow Gaussian profiles, while the components of the corresponding BELs follow Voigt profiles. We reached to this conclusion after testing all available distributions, namely Lorentz, Gauss, Voigt, Rotation (Danezis et al. 2003), Gauss-Rotation (Danezis et al. 2007; Lyratzi et al. 2007). Our tests showed that for Si IV and C IV BALs the best fit is obtained if their components follow Gaussian profiles while for BELs Voigt profiles.

Thus, spectral fitting of BALs requires three free parameters for each Gaussian component, namely the radial velocity (V_{rad}), which is measured at line center, the optical depth at line center (τ_o) and the Gaussian standard deviation (σ). Therefore, a multicomponent fit, especially in the case of resonance doublets such as Si IV and C IV, requires a large parameter space. As a result, the problem of fitting Si IV and C IV BAL troughs is twofold: (a) achieve the best fit and (b) guarantee the uniqueness of the best fit. To conclude, we are not only interested in achieving the best fit of Si IV and C IV BALs but also in ensuring that the number of Gaussian components and the values of the measured parameters are uniquely determined.

The two problems mentioned above led us introduce a series of fitting criteria which guarantee not only the best fit of Si IV and C IV BALs but also the uniqueness of it. Before moving to the fitting criteria, we would like to point out the following:

• We choose to fit and study resonance lines and not singlets. In the case of singlets, it is very difficult, if not impossible; to constrain the number of components required to fit the complex and broad absorption/emission profiles. In the case of singlets, the more the components used during the fitting process the better the fit becomes. We note that we do not treat resonance lines as singlets but instead we take into account that Si IV and CIV absorption/emission lines are resonance doublets.

Therefore, we model one blue and one red component for each line of a given absorption/emission doublet, independently (taking into account their relations originating in atomic physics). Treating doublets as singlets is an oversimplification which can cause incorrect measurements in physical parameter values. This is highly expected especially in the case of Si IV in which the wavelength separation between the members of the doublet is large (~1930 km/s).

- Multicomponent analysis of BAL troughs is controversial. According to Laor et al. (1994), the major problem of multicomponent fits is that the best-fit solution is not unique. Thus, the degeneracy of a multicomponent fit will be high unless both ions are fitted simultaneously. In order to overcome this problem and find a unique final solution which is also independent of initial parameter values, we fit simultaneously the BALs of both ions with parameters tied. During the fitting process we assume that both ions follow the same kinematic structure. Finally, we consider doublets, of both ions, which are smooth and broad compared to thermal line widths and show optical depth ratios inconsistent with 2:1. In that way we ensure that these lines are intrinsic to the quasar (Hamann et al. 1997; Misawa et al. 2007).
- We consider objects that have at least moderately strong absorption in one of their BAL troughs (with a "balnicity index" of $BI_0 > 100 \text{ km/s}$ as measured by Gibson et al. 2009).

As a result, in a previous paper (Stathopoulos et al. 2015) we introduced two sets of fitting criteria. The first one sets the appropriate restrictions which apply to the fitting parameters (V_{rad} , τ_0 , σ) between the blue and red member of a doublet. These restrictions stem from atomic physics. The second set provides the restrictions applied between two different ions such as Si IV and C IV.

1. Criteria between the blue and red component of a doublet (C IV $\lambda\lambda$ 1548.187, 1550.772 Å and Si IV $\lambda\lambda$ 1393.755, 1402.77 Å).

- a. The number of blue and red components of a doublet must be exactly the same. This means that to each component of the 1548.187 Å C IV line corresponds a component of the 1550.772 Å, C IV line. The same applies to the Si IV doublet.
- b. Each C IV 1548.187 Å component at a specific velocity shift has its corresponding C IV 1550.772 Å component at the same velocity shift. The same applies to the Si IV doublet. However, we require that the difference in velocities at line centers must not differ from the expected doublet separation by more than two velocity bins (this condition is adopted from Wildy et al. 2015). In the spectra studied in this paper, one velocity bin corresponds to ~ 69 km/s.
- c. The C IV 1548.187 Å component and C IV 1550.772 Å component at the same velocity shift must have the same width. The same applies to the Si IV doublet. The components' FWHM cannot be smaller than the spectrograph's FWHM, which sets an upper limit on the number of components required to achieve the best fit.
- d. For emission lines, the ratio of optical depths between the blue and the red component is $\tau_b/\tau_r = 2$, as dictated by atomic physics (Savage & Sembach 1991).

e. For absorption lines the ratio of optical depths between the blue and the red component is free to vary between $1: 1 \le \tau_b / \tau_r \le 2: 1$ (Wildy et al. 2015) in order to account for non-black saturation.

As previously mentioned, the first four restrictions (a-d) are a consequence of atomic physics. In the case of Si IV and C IV there are two, fine structure, sub-levels which means that the observed spectral lines are resonance doublets. Both members of a doublet are characterized by the same width, the wavelength separation between the members of a doublet is fixed and the ratio of optical depths is determined by the ratio of oscillator strengths (Savage & Sembach 1991).

The last restriction deviates from atomic theory. However there are physical mechanisms which can produce discrepant optical depth ratios for doublet or multiplet transitions: (a) due to photons from the background emission source that are not absorbed and/or are scattered into the observer's line-of-sight (Ganguly et al. 1999), (b) local emission by the absorbers (Wampler et al. 1995) and (c) geometric partial coverage of the continuum and/or BEL source by the absorbing medium. According to the last scenario, the unabsorbed flux changes the relative depth of the lines (Wampler et al. 1995; Arav et al. 1999a, b).

2. Criteria between C IV and Si IV components at the same outflow velocity from the corresponding emission redshift.

- a. Both C IV and Si IV doublets consist of the same number of components.
- b. Each C IV 1548.187 Å (blue) component at a specific velocity shift has its corresponding Si IV 1393.755 Å (blue) component at the same velocity shift (we require that the difference in velocities between Si IV blue and C IV blue components must not be larger than ~ 200 km/s which is the error in velocity measurements). The same applies between the C IV 1550.772 Å (red) components and the Si IV 1402.77 Å (red) components. In practice, Si IV absorption components are shallower than the ones appearing in C IV. So, there is the possibility that a very shallow C IV component has the corresponding Si IV at the same outflow velocity which possibly is not detectable.
- c. $(\tau_b/\tau_r)_{CIV}$ at a specific velocity shift must be the same as $(\tau_b/\tau_r)_{SIV}$ at the same velocity shift. In this study, during the fitting process, we relax the criterion 2(c) by letting the ratios $(\tau_b/\tau_r)_{CIV}$ and $(\tau_b/\tau_r)_{SIV}$ take different values.

This set of criteria is based on the assumption that Si IV and C IV belong to the same cloud (Hamann et al. 2001; Hamann & Sabra 2004; Capellupo et al. 2012) and they follow the same kinematic structure. Furthermore, both ions are assumed to have the same temperature (Rauch et al. 1996) in spite of their different ionization potentials. In fact, Si IV and C IV are high ionization lines formed in regions of temperature $10^4 - 10^5$ K.

We point out that the fitting code is forced to fulfill all the criteria mentioned above. So, these criteria are in fact the constrains that are followed during the fitting process and they are not set in order to cross check our results in the end.

5. Observations and spectral fitting

5.1. Quasar sample

In this work we study 20 quasars selected from a sample of 2005 known variable BALQSOs presented in Table 5.1. The BALQSOs under study are chosen from the SDSS Data Release 9 Broad Absorption Line (BAL) Quasar Variability Survey. The main sample of BAL quasars contains 2005 objects assigned the ancillary target flag VARBAL. These 2005 objects were selected to be optically bright and to have at least moderately strong absorption in one of their BAL troughs (with a balnicity index of $BI_0 > 100 \text{ km/s}$ as measured by Gibson et al. 2009). From this sample we selected BALQSOs that meet the following criteria:

- a. Spectra with zWarning equal to zero which means that they have no known problems,
- b. Redshifts in the range 1.98 < z < 3.2 where the lower limit is set in order to ensure good coverage of both Si IV and C IV regions,
- c. Si IV and C IV exhibiting BALs over corresponding velocities,
- d. At least one of the two epoch spectra should have signal to noise ratio larger than 10.

In the redshift range 1.98 < z < 3.2 we found 618 objects exhibiting Si IV and/or C IV BALs. From these objects we rejected 161 exhibiting C IV BALs without Si IV BALs over corresponding velocities. Thus, our main sample includes 461 objects.

In the current work we study 20 of the 461 BALQSOs which present:

- a. V_{max} outflow < 20000 km/s in order to avoid overlapping between the broad absorption of Si IV and the emission of Si II λ 1304 Å and O I λ 1306 Å.
- b. BALs which exhibit different types of profiles in terms of structure, i.e. smooth P-Cygni profiles which set in near zero outflow velocity, broken up profiles with resolved absorption features, detached absorption profiles by more than 3000 km/s from the corresponding emission, profiles with multiple troughs which begin to form near zero velocity, profiles with multiple troughs detached from the corresponding emission by more than 3000 km/s.

5.2. Spectra preparation

Before proceeding to the fitting process, we correct all spectra for galactic extinction using the reddening curve of Fitzpatrick & Massa (1999) with $R_V = 3.1$. We obtain E(B -V) from the NASA Extragalactic Database (NED), which uses the dust maps of Schlegel et al. (1998). We converted the observed wavelengths of the spectra to the rest frame using redshifts from the catalogues of Filiz Ak et al. (2013) and Shen et al. (2011). We smoothed the spectra and error arrays using an average filter of a different width for each quasar, depending on the S/N of the spectrum.

5.3. Continuum, line fitting and goodness of fit

For the continuum we fit a power law model to a set of continuum windows (1290-1300 A, 1445-1465 Å, 1685-1715 Å, 1965-2000 Å) free of strong emission lines using the Levenberg – Marquardt minimization process. For the power law continuum, we use:

$$F(\lambda) = F_{2000} \times \left(\frac{\lambda}{2000}\right)^{a}$$

The error for the power-law continuum at the wavelength of λ by error propagation is:

$$\delta(F_{\rm con}) = F_{\lambda} \times \sqrt{\left(\frac{\delta F_{2000}}{F_{2000}}\right)^2 + (\ln\lambda - \ln 2000)^2 \delta \alpha^2}$$

where the errors of δ F2000 and $\delta \alpha$ are given in the power law fitting. The values of the spectral indices (α) and their corresponding errors are given in the fifth column of Table 5.1.

When performing multicomponent fits to Si IV and CIV BALs, as previously mentioned, we use Eq. (4.1) twice: once in order to synthesize all the blue components of a BAL and once in order to synthesize all the red components of the same BAL. We then synthesize these two sets of profiles in order to fit the complex BAL profile.

Based on the proposed fitting criteria, spectral fitting is performed as follows: for example, each time a new Si IV blue component is inserted, with initial parameter $(V_{rad}, \tau_0, \sigma)$ values then the values of the parameters of the corresponding Si IV red component and the corresponding C IV blue component, at the same mentioned fitting criteria. Furthermore, from the values of the C IV blue component, the values of the parameters of the corresponding C IV red component are automatically determined. The same applies in the case we change the value of one or more fitting parameters of the blue/red component of an ion. Then the values of the parameters of the corresponding red/blue component of the same ion as well as the parameter values of the components of the other ion are automatically changed according to the fitting criteria.

Each time we increase the number of components (preserving equal number of components between Si IV and C IV), we iterate and test the goodness of fit using the reduced chi-squared. The iterative process continues until the operator is satisfied that the data are satisfactory modeled. Data are assumed to be satisfactory modeled when we get a reduced $\chi^2 \leq 2$ (Laor et al. 1994).We note that we are looking for the minimum as well as the same number of Si IV and C IV components that meet the $\chi^2_{reduced} \leq 2$ criterion.

Through this process (see Fig. 5.1) we ensure that the best fit is uniquely determined. As a result, the number of components, used to achieve the best fit of Si IV and C IV BALs and the values of the calculated parameters are also uniquely determined.

We use the same process when fitting both epoch spectra. However, it should be noted that the two epoch spectra are modeled independently, i.e. the fitting process is applied independently for the first and second epoch spectra.

We estimate the uncertainties of absorption line fitting parameters by adding Gaussian noise to the best fits. The width of the Gaussian at each pixel equals the flux uncertainty at that pixel. For each best fit, we produce 60 noisy spectra and then we fit each one in the same manner we fit the original spectrum. We measure the uncertainty of each parameter from its distribution.

It should be noted that the model (Danezis et al. 2003, 2007; Lyratzi et al. 2007) has been used to resolve broad absorption profiles, of transitions such as C IV Si IV, Mg II, N V, into multiple narrow components in the case of hot emission stars (see, Danezis et al. 2003, 2007, 2009; Lyratzi et al. 2003, 2005, 2007; Antoniou et al. 2011a, b, 2014 and references therein) as well as in the case of quasars (see, Lyratzi et al. 2009, 2010, 2011; Stathopoulos et al. 2015, 2017 and references therein). To conclude, we note that in two previous papers (Stathopoulos et al. 2015, 2017) we showed that Si IV and C IV BALs, in individual BALQSOs, consist of the same number of absorption components which is confirmed by the study of Lu & Lin (2018).

6. Results

6.1. Fitting results

In this section we provide the results obtained from the fitting process of Si IV and C IV BALs in the case of the whole sample of 20 quasars. In Fig. 6.1 we give, as an example, the best fits of the Si IV and C IV spectral regions of J155335.78+324308.1 and J101056.69+355833.3. The observed spectrum is denoted with black dotted line while the black, thick, solid line corresponds to the best fit. In each best fit we provide the reduced χ^2 which serves only as a measure of the quality of the fit. In Fig. 6.2 we give the best fits for the whole quasar sample. From the values of the calculated parameters V_{rad} , τ_0 , σ (where FWHM = $\sigma\sqrt{8\ln 2} = 2.355\sigma$), in Tables 6.2-6.9 and Fig. 6.3 one can observe that all the fitting criteria are applied with consistency and accuracy during the fitting process.

In the 5th column of Table 5.1 we give the values of the spectral indices (α) obtained from the continuum fitting as well as their corresponding errors. In Tables 6.2-6.9 we give the values of the parameters V_{rad}, FWHM, τ_0 obtained from the best fits of Si IV and C IV BALs in the case of the studied BALQSOs. The true FWHM is determined considering the instrumental width of the spectrograph, by using the following equation:

$$FWHM_{obs}^2 = FWHM_{true}^2 + (1 + z)^{-2}FWHM_{inst}^2$$

where the instrumental broadening (FWHM_{inst}) is the observed-frame while the observed (FWHM_{obs}) and true (FWHM_{true}) full width at half maximum are the rest-frame.

In Fig. 6.4 we show the behavior of Si IV and C IV components' FWHM with respect to radial velocity, for the 20 BALQSOs. The FWHM of Si IV_{blue} and Si IV_{red} components is the same which is also the case between C IV_{blue} and C IV_{red} components. So, in Fig. 6.4 we do not give different graphs for the blue and red components. By performing a Spearman's correlation test we conclude that there is a significant positive correlation which means that there is an increasing monotonic trend between FWHM and V_{rad} . This means that the FWHM has the trend to increase as the outflow velocity ($|V_{rad}|$)

increases. The results of the correlation are: a) for Si IV, R = 0.13238 and P = 0.03961. The correlation is considered statistically significant at the 0.05 level, b) for C IV, R = 0.18006 and P = 0.00496. The correlation is considered statistically significant at the 0.05 level.

In Fig. 6.5 we plot, for the 20 BALQSOs, the optical depths τ_0 (at line centers) of the blue and red components of Si IV and C IV with respect to radial velocity V_{rad} . The Spearman correlation gives: a) for Si IV blue components, R = 0.18743 and P = 0.0033 which means that the correlation is considered statistically significant at the 0.05 level, b) for Si IV red components, R = 0.19173 and P = 0.0033, which means that the correlation is considered statistically significant at the 0.05 level, b) for Si IV red components, R = 0.19173 and P = 0.0033, which means that that the correlation is considered statistically significant at the 0.05 level, c) for C IV blue components R = 0.32595 and P = 0, which means that that the correlation is considered statistically significant at the 0.05, d) for C IV red components, R = 0.31596 and P = 0, which means that that the correlation is considered statistically significant at the 0.05. The correlations show a decreasing monotonic trend between $|V_{rad}|$ and τ_0 . All the above indicate that the components' optical depths have the trend to decrease as the outflow velocity ($|V_{rad}|$) increases. The fact that absorption is weaker at large velocities is consistent with the findings of Korista et al. (1993) and Capellupo et al. (2011).

In Fig. 6.6 we provide the 3D plots that describe the correlation between the optical depths (τ_0), the FWHMs and the radial velocities of the Si IV and C IV blue and red components respectively. From the plots one can observe that the BAL region does not consist of a smooth and homogeneous wind but of an unstable outflow inside which inhomogeneities (clouds) are formed. Due to the fact that clouds contain both Si IV and C IV absorbers, in Fig. 6.6(c) we plot the correlation between τ_0 , FWHM and V_{rad} for both Si IV and C IV components. As one can observe, as the outflow velocity decreases (absorption components closer to the corresponding BEL), the FWHM also decreases while the optical depth increases.

In Fig. 6.7(a) we plot, for the 20 BALQSOs, the FWHMs of Si IV components with respect to the FWHMs of the corresponding C IV components at the same velocity, within the same quasar. Every point in the diagram corresponds to Si IV and C IV components which within the same quasar have the same velocity from the corresponding emission line. It is obvious that, within the same quasars, Si IV and C IV components at the same velocity are characterized by $FWHM_{CIV} \ge FWHM_{SIIV}$. There are 4 Si IV components which have C IV components, at the same velocity, with $FWHM_{CIV} \le FWHM_{SIIV}$. However, this result is marginal because it is within the error of FWHM calculations. In the graph, the red line corresponds to the linear regression with equation y = 0.67x + 61.8 with $R^2 = 0.90383$ and Pearson's R = 0.9509 and P = 0.00001 which means that the correlation is significant at the 0.01 level.

The fact that, within the same quasar, C IV components have larger widths than the corresponding Si IV components at the same velocity was expected since the thermal width of C IV is larger than the thermal width of Si IV.

In Fig. 6.7(b) every point of the diagram corresponds to the ratio < FWHM_{CIV}/ FWHM_{SiIV} > where both FWHMs correspond to the same quasar and to Si IV and C IV components at the same velocity shift. As one can observe these ratios, for different velocities, have a mean of 1.37 ± 0.22 with coefficient of variation CV = 0.16. The value of the ratio of FWHMs can be used as criterion that determines the validity of future simulations of Si IV and C IV BAL troughs In Fig. 6.8 we plot, on the left, the optical depths τ_0 of Si IV_{blue} components with respect to the optical depths of the corresponding C IV_{blue} components, at the same velocity. We note that each point corresponds to Si IV and C IV components that within the same quasar have the same velocity shift. On the right panel we do the same but for the red Si IV and C IV components. From a total number of 241 components, of the 20 BALQSOs, the ~34% (82/241) of Si IV_{blue} components has larger optical depths than the corresponding C IV_{blue} components at the same velocity. Also, ~32% (76/241) of the Si IV_{red} components have larger optical depths than the corresponding C IV_{red} components at the same velocity. In most cases, within the same quasar, at the same velocity C IV components are stronger than Si IV components.

In Fig. 6.9 we plot the ratio τ_b/τ_r (Si IV) with respect to the ratio τ_b/τ_r (C IV). Every point in the diagram corresponds to Si IV and C IV of the same quasar that share the same outflow velocity. According to atomic physics for C IV ($\lambda\lambda$ 1548, 1551) $\tau_{1548}/\tau_{1551} \approx 2/1$ and for Si IV ($\lambda\lambda$ 1393, 1402 Å) $\tau_{1393}/\tau_{1402} \approx 2/1$ (Savage & Sembach 1991). As a result, all values in the diagram should be concentrated on point (A) which obviously is not the case. The horizontal dashed line indicates all those Si IV doublets for which $\tau_b/\tau_r = 2$ while the corresponding C IV components have values between 1 and 2. The vertical dashed line indicates all those C IV components for which $\tau_b/\tau_r = 2$ while the si IV and C IV which within the same quasar and at the same velocity have τ_b/τ_r (Si IV) = τ_b/τ_r (C IV). The red diagonal line indicates all those Si IV and C IV which within the same velocity, have τ_b/τ_r (Si IV) = τ_b/τ_r (C IV).

As one can observe, the optical depth ratios have values between 1 and 2 and in the majority of cases diverge from the expected theoretical value. This fact can be interpreted on the basis of partial coverage of the continuum source by the absorbers. In fact, it is possible that Si IV traces a different area of the outflowing gas cloud than C IV. A moving cloud across our line of sight will cause an increase or decrease of the number of absorbers of C IV with respect to Si IV. As result this will cause changes in covering fractions which will artificially cause deviations of the ratios τ_b/τ_r (Si IV), τ_b/τ_r (C IV) from the theoretical value. All the above are indications of the existence of inhomogeneities (clouds) within the outflow.

Fig. 6.10 we plot, for the 20 BALQSOs, the EWs of Si IV components with respect to the EWs of the C IV components. Each point in the diagram corresponds to Si IV and C IV components of the same quasars and of the same outflow velocity. We present two plots one for the blue Si IV and C IV components (left) and one for the red Si IV and C IV red components (right). From 241 blue components of Si IV and 241 blue components of C IV there are 193 (80%) C IV components with $EW(CIV_{blue}) > EW(SiIV_{blue})$. From 241 red components there are 192 (80%) C IV red components with $EW(CIV_{blue}) > EW(CIV_{red}) > EW(SiIV_{red})$.

6.2. Variability results

In this section we provide the results obtained from the variability study of Si IV and C IV BALs in the sample of 10 quasars. For the purpose of determining which components exhibit variations in optical depths τ_0 , radial velocities V_{rad} and widths (FWHM),

between two different epochs, we define a measurement of the deviation between two components, in units of σ using the following equation from Filiz Ak et al. (2013).

$$N_{\sigma} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}$$

where x_1, x_2 are either the optical depths at line centres, or the radial velocities or the FWHMs of the components under comparison that are calculated through the best fits and σ_1, σ_2 are the corresponding uncertainties. We identify variable components of BAL troughs, when an absorption component is detected with $N_{\sigma} \ge 1$ or $N_{\sigma} \le -1$.

6.2.1. Variations in radial velocities of components

We do not find variations in components' velocity shifts, between the two epochs, in any of the studied QSOs. This result is evident in Table 6.2 and Fig. 6.11 where we plot: (a) the radial velocities of C IV blue components (C IV_b: l 1548.187 Å) of the second epoch spectra with respect to the radial velocities of C IV blue components of the first epoch spectra, (b) the radial velocities of C IV red components (C IV_r : λ 1550.772 Å) of the second epoch spectra. (b) the radial velocities of C IV red components (C IV_r : λ 1550.772 Å) of the second epoch spectra with respect to the radial velocities of C IV red components of the first epoch spectra. In panels (c) and (d) we do the same as in panels (a) and (b) but for Si IV blue and red components (Si IV_b: λ 1393.755 Å, Si IV_r : λ 1402.77 Å) respectively. From the graphs it is obvious that C IV and Si IV blue and red components do not exhibit variations in their velocity shifts between the two different epochs. However, a more careful look in Table 6.2 indicates components which exhibit small variations in their radial velocities. These variations are ~200- 300 km/s, a value within the error of radial velocity measurements. Consequently, we do not consider those components as variable.

6.2.2. Variations in components' FWHMs

In Fig. 6.12 we plot: (a) the FWHMs of C IV blue components of the second epoch spectra with respect to the FWHMs of C IV blue components of the first epoch spectra, (b) the FWHMs of C IV red components of the second epoch spectra with respect to the FWHMs of C IV red components of the first epoch spectra. In panels (c) and (d) we do the same as in panels (a) and (b) but for Si IV blue and red components. In the majority of cases C IV and Si IV absorption components do not exhibit variations in their widths between the two different epochs. However, in the case of C IV we observe 5 out of 118 (\sim 4%) absorption doublets which show changes in their widths. In the case of Si IV we observe 12 out of 118 (\sim 10%) absorption doublets which show changes in their widths show changes in their widths (see Table 6.3).

6.2.3. Variations in components' optical depths

In Table 6.10 we provide for each BALQSO the value of the variability measure $N_{\sigma}(\tau_0)$ for the optical depths of C IV and Si IV blue and red absorption components. The sample of ten BALQSOs exhibits 118 Si IV doublets and 118 C IV doublets over corresponding

velocities. As one can observe Si IV and C IV BALs exhibit optical depth variations only in individual components. None of the 10 BALQSOs exhibits variability in its entire BAL trough. We observe three cases (J114548.38+393746.6, J155335.78+324308.1, J023252.80-001351.1) in which within individual troughs all variable components exhibit coordinated variability (within an individual absorption trough of Si IV or CIV all variable components become stronger or weaker). The rest seven quasars exhibit non coordinated variability, between individual components, within their absorption troughs. We also observe one case (J114704.46+153243.3) in which a weak doublet has disappeared between the two observations. Finally, we observed one case (J101056.69+355833.3) in which two high velocity, broad and shallow, components have emerged between the two epochs.

In Figures 6.16 and 6.15 we examine the dependence of Si IV and C IV absorption components' variability on velocity. We split the velocity range into bins of 1000 km/s width. In each bin we count the number of observed absorption components and the number of variable absorption components. In Fig. 6.14(a) we plot the number of observed Si IV and C IV blue absorption components (dashed line) and the number of variable Si IV blue (shaded bars) and variable C IV blue (bars with pattern) components in each velocity bin. In Fig. 6.14(b) we do the same but for Si IV and C IV red absorption components. We find that from a number of 118 Si IV doublets and 118 C IV doublets over corresponding velocities, Si IV exhibits higher incidence of variability. More specifically, 68 out of 118 (~58%) Si IV blue components exhibit variability in its optical depths while 44 out of 118 (\sim 37%) Si IV red components show variable optical depths. On the other hand, 52 out of 118 (\sim 44%) C IV blue components exhibit variability in its optical depths while 45 out of 118 (\sim 38%) C IV red components show variable optical depths. If we consider a doublet variable as long as one of its members (blue or red) exhibits variability then we have 75 out of 118 (~64%) Si IV doublets that show optical depth variations while we find 63 out of 118 (~53%) C IV doublets exhibiting changes in their optical depths. The comparison between the numbers of variable Si IV and C IV absorption doublets in each velocity bin is shown in Fig. 6.14(c). With shaded bars we denote the number of variable Si IV doublets in each velocity bin while with dashed bars in pattern we denote the number of C IV variable doublets in each velocity bin.

Furthermore, C IV and Si IV absorption components exhibit variability in a wide range of velocities (see Figs. 6.14, 6.15). The number of observed Si IV and C IV absorption components peaks in the range between -2000 and -9000 km/s. The number of variable Si IV and C IV blue components as well as the Si IV red components also peaks at the same range of velocities (-2000 and -9000 km/s). However, the number of variable C IV red components peaks at about -6000 and -9000 km/s. In the majority of velocity bins Si IV exhibits higher incidence of variability. In both panels C IV shows higher incidence of variability in the range -7000 and -8000 km/s. Furthermore, from Fig. 6.15 we do not observe any trend for greater incident of variability as a function of velocity.

Finally, we examine the occurrence of variability in Si IV doublets without corresponding changes in C IV doublets at the same velocities and vice versa. We find that from 75 variable Si IV doublets there are 38 which show changes of the corresponding C IV doublet at the same velocity (\sim 51%). On the other hand, from 63 variable C IV doublets there are 38 that present changes in the corresponding Si IV

doublets at the same velocity (\sim 60%). As a result, it is more possible to find a variable Si IV component when C IV exhibits variability at the same velocity and not the opposite.

6.2.4. Coordinated and non-coordinated variations

In this section we examine the variability behaviour between the members of Si IV and C IV doublets. More specifically we examine coordination between (a) Si IV_{blue} – Si IV_{red} , (b) C IV_{blue} – C IV_{red} , (c) Si IV_{blue} – C IV_{blue} , (d) Si IV_{red} – C IV_{red} .

In the case of Si IV, we find 36 out of 75 (~48%) variable doublets which exhibit coordinated variations between their members, i.e. both members of a doublet strengthen or weaken. On the other hand, we find only 1 doublet out of 75 (~1%) in which one member of the doublet strengthens while the other weakens over time. Finally, we find 38 out of 75 (~51%) variable doublets in which only one member of the doublet varies while the other does not change at all.

In the case of C IV there are 32 out 63 (\sim 51%) variable doublets which exhibit coordinated variations between their members. On the contrary, we find 2 out of 63 (\sim 3%) doublets in which one member of the doublet strengthens while the other weakens over time. Finally, there are 29 out of 63 (\sim 46%) variable doublets in which only one member of the doublet varies while the other remains constant.

From 118 Si IV_{blue} and 118 C IV_{blue} components there are 28 (~24%) which vary over corresponding velocities. 23 out of 28 (~82%) components vary in concert (both strengthening or weakening) while the rest 5 show non coordinated variations (one strengthens while the other weakens). From 118 Si IV_{red} and 118 C IV_{red} components there are 17 (~14%) which vary over corresponding velocities. 15 out of 17 (~88%) components vary in concert while the rest 2 show non coordinated variations.

7. Discussion

7.1. Discussion on the sample of 20 BALQSOs

Using GR model (Danezis et al. 2003, 2007; Lyratzi et al. 2007) and the physical model and fitting criteria proposed by Stathopoulos et al. (2015, 2019) as well as ASTA software (Tzimeas et al. 2019) we analyzed Si IV and C IV BAL troughs to the uniquely determined number of individual components they consist of. As a result, we study each individual absorption component independently which means that we study each individual absorption system (cloud) in the line of sight which is responsible for the formation of BALs. By analyzing each Si IV and C IV broad absorption trough to the components it consist of, we calculate the values of optical depth (τ_0), Full Width at Half Maximum (FWHM), Equivalent Widths (EW) and radial outflow velocity (V_{rad}) of each individual component.

The calculated FWHMs of Si IV and C IV absorption components range between 270 (km/s) \leq FWHM_{SIIV} \leq 2020 (km/s) and 280 (km/s) \leq FWHM_{CIV} \leq 2730 (km/s) respectively. The temperature of the BAL region ranges between 10⁴ – 10⁵K. For Si IV

the thermal width in 10^4 K gas is FWHM ~ 4 km/s and for a gas of 10^5 K, FWHM ~ 12 km/s. For C IV, these values are about 6 km/s and 20 km/s respectively. As for the microturbulent velocities these range from tenths of km/s to a few hundred, though Bottorff et al. (2000) showed that a microturbulent velocity of 10^3 km/s does not violate observations in the case of BELs. So, the thermal and microturbulent widths are too small compared to the widths of the components we use in the fits. We point out that the microturbulent velocity field is also described by Gaussian distribution.

In order to explain this discrepancy, we proposed (Stathopoulos et al. 2015) that what we call clouds are clusters of subunits called clumps (clumps – regions II, Fig. 4.1). To avoid confusion, we will always refer to the larger, more distinct structures as "clouds" and the smaller structures as "clumps". Each clump produces an absorption line, the width of which depends on thermal and microturbulent motions of ions inside the clump. The synthesis of all these clump lines that are very close in velocity space and overlap, produce a broad component corresponding to a cloud. The synthesis of broad components originating in clouds produces the broad absorption trough known as BALs.

The fact that Si IV and C IV BALs can be uniquely and accurately fitted by a cloud model is a first indication that BAL outflows are not smooth and homogeneous but are clumpy. Secondly, the fact that Si IV and C IV BALs can be analyzed to a uniquely determined number of components, according to the proposed method by Stathopoulos et al. (2015, 2019) suggests that BAL outflows are far from being smooth and homogeneous. Instead, radiative instabilities cause clouds to form inside the turbulent outflow. Si IV and C IV clouds are characterized by similar distances, from the central black hole, kinematics and physical conditions (Stathopoulos et al. 2015, 2017, 2019). The fact that Si IV and C IV BALs consist of the same number of components characterized by similar distances, kinematics and physical conditions indicates that both ions belong to the same clouds and are art of the same outflow (Stathopoulos et al. 2015, 2017, 2019).

These findings are supported by the work of Lu & Lin (2018) who studied Si IV and C IV BALs of SDSS J002710.06-094435.3. They found that both BALs consist of the same number of components, formed in clouds, and have similar distances, kinematics and physical conditions. However, there are several key differences between the works of Stathopoulos et al. (2015, 2017, 2019) and Lu & Lin (2018).

- Although Lu & Lin (2018) assume that Si IV and C IV BALs consist of the same number of components they do not answer the crucial question concerning the exact number of components composing BALs. To be more specific, they do not provide a method that determines the number of components required to fit Si IV and C IV BALs in a unique manner.
- Due to the lack of criteria, Lu & Lin (2018) succeeded in fitting only the Si IV but not the C IV BAL. They just detected the same number of components in the C IV but because the components were blended, they did not fit the whole profile.

In contrast, in the current thesis we propose a series of fitting criteria of Si IV and C IV BALs (Stathopoulos et al. 2015, 2019) which guarantee that the number of components each BAL is analyzed into is uniquely determined.
As one can observe in Tables 6.2-6.9 and in Fig. 6.3, the criteria used during the fitting process of Si IV and C IV BALs are applied with accuracy and consistency. These criteria ensure the uniqueness of the best fit.

The fact that both Si IV and C IV BALs extend in the same velocity range indicates that both ions are parts of the same outflow. Furthermore, the fact that within the same quasar, Si IV and C IV BALs have the same number of components indicates that both ions belong to the same absorbing system i.e. to the same cloud.

In Fig. 6.4 one can observe that Si IV and C IV components tend to increase their widths (FWHM) as the outflow velocity increases. On the other hand, in figure 6.5 we observe that the components' optical depths tend to decrease with increasing outflow velocity.

In Fig. 6.6 one can observe that Si IV and C IV BAL regions do not constitute a smooth wind but a clumpy medium. Furthermore, from the figures it is clear that Si IV and C IV absorption components at higher outflow velocities have large widths but small optical depths, while components at small outflow velocities have small widths but larger optical depths. Figure 6.6 indicates that the powerful outflow emanating from the accretion disc is not smooth and homogeneous but clumpy. Based on this figure we propose that the outflow close to the accretion disc is highly inhomogeneous consisting of higher density clouds (and thus of larger optical depths). As the outflow is accelerated outwards the cloud density falls as the outflow velocity increases. Far from the accretion disc the clumpy outflow evolves into a smooth wind. As the clumpy outflow tends to evolve into a smooth wind, we expect to observe high velocity clouds to exhibit smaller optical depth but larger FWHMs.

All the above arguments are consistent with a series of studies:

- In in models of Murray et al. (1995); Elvis, (2000); Hall & Hutsemékers, (2004); Higginbottom et al. (2013); Takeuchi et al. (2013), the wind is launched perpendicular to the accretion disc and is accelerated radially by radiation pressure. If the quasar is viewed through the wind along the outflow then broad absorption lines appear in the spectra (for a range of viewing angles according to the model). According to these models, along the outflow as the distance from the accretion disc increases so does the velocity of the outflow and the temperature. On the contrary, the gas density increases. If the quasar is viewed along the outflow, because the outflow is accelerated radially the low velocity absorption components originate in regions closer to the central black hole. On the other, hand high velocity absorption components originate in regions of the quasar.
- According to RHD simulations by Takeuchi et al. (2013) due to the fact the gas density decreases along the direction of acceleration, the Rayleigh–Taylor instability sets in. This instability is responsible for the formation of clumps which are accelerated outwards. Clumps of sizes $l\sim 10r_S \approx 3 * 10^{12}$ m are formed at distances $250r_S 300r_S$ (r_S is the Schwarzschild radius). At distances larger than 500 r_S the density of the clumps drops and the outflow tends to become smooth and homogeneous. A similar picture is provided by Weymann et al. (1985) and Faucher-Giguére (2012). According to Weymann et al. (1985) the larger clouds are followed by smaller ones (cloudlets) which are ripped from the main clouds and are accelerated to higher velocities. Finally, according to Faucher-Giguére (2012) radiative shock wave propagating in a cloud shreds the cloud into cloudlets.

In Fig. 6.7 we can observe that within the same quasars Si IV and C IV components at the same velocity shift, from the corresponding emission line, are characterized by $FWHM_{CIV} \ge FWHM_{SIIV}$. This result was expected due to the fact that Si IV has smaller thermal width than C IV. The fact that this result is confirmed by the theory indicates the validity of our simulations.

A very interesting result can be seen in figure 6.7(b). As one can observe the ratio < FWHM_{CIV}/FWHM_{SiIV} >, between Si IV and C IV components that in the same quasar have the same outflow velocity, is 1.37 ± 0.22 with coefficient of variation CV $\approx 16\%$. The value of the ratio of FWHMs can be used as criterion that determines the validity of future simulations of Si IV and C IV BAL troughs

As shown in Fig. 6.8 in the majority of cases, within the same quasar, at the same velocity C IV components are stronger than Si IV components. From a total number of 241 components, of the 20 BALQSOs, the ~34% (82/241) of Si IV_{blue} components has larger optical depths than the corresponding C IV_{blue} components at the same velocity. Also, ~32% (76/241) of the Si IV_{red} components have larger optical depths than the corresponding C IV_{blue} components at the same velocity. Also, ~32% (76/241) of the Si IV_{red} components have larger optical depths than the corresponding C IV_{red} components at the same velocity. If solar abundances are assumed, then C IV would be more abundant than Si IV. So, we should expect that within the same quasar, all C IV components to be stronger than the corresponding Si IV components with optical depths larger than the optical depths of the corresponding C IV components at the same velocity shifts indicates that in these cases either solar abundances are not valid or that Si IV has larger covering fraction than C IV. We note that cases where intensity ratios Si IV/C IV > 1 have been observed in the case of Be stars (Henize et al. 1976) and cataclysmic variables (Gänsicke et al. 2003).

The fact that in the majority of cases the ratios τ_{blue}/τ_{red} (Si IV) and τ_{blue}/τ_{red} (C IV) deviate from the theoretical value of 2:1 (see Fig. 6.9), indicates that Si IV and C IV absorbers do not fully cover the continuum source. Furthermore, the fact that within the same quasar we find Si IV and C IV components at the same velocity shift, with τ_{blue}/τ_{red} (Si IV) $\neq \tau_{blue}/\tau_{red}$ (C IV) indicates that both ions have different covering fractions. If we accept that both ions are part of the same outflow and that each cloud contains both Si IV and C IV then Si IV can trace a different are of the outflowing cloud than C IV. So, if a cloud moves across our line of sight it is possible to observe different variability characteristics between Si IV and C IV which is consistent with the results of our variability study which follows.

From Fig. 6.10 one can realize that within the same quasars C IV components have larger EW than Si IV components at the same velocity. To be more specific about 80% of C IV components are characterized by $EW(CIV_{red}) > EW(SIIV_{red})$.

7.2. Discussion on variability results

In this section we discuss the implications of the results derived from variability analysis. In view of these results we also discuss different scenarios for the origin of Si IV and C IV broad absorption line variability.

7.2.1. Radial velocity and FWHM variations

As is evident in Fig. 6.11, Si IV and CIV doublets do not change their radial velocities between the two different epochs. Therefore, we do not observe any evidence indicating acceleration or deceleration of the BAL material in the line of sight. Given the statistics in Grier et al. (2016), this is expected due to the small sample size of this study.

In Fig. 6.12, one can observe that in the majority of cases the widths of Si IV and CIV absorption components do not change over time. In the case of C IV, we find that 5 out of 118 (~4 per cent) doublets exhibit variation in their FWHMs. In the case of Si IV, we find that 12 out of 118 (~10 per cent) doublets exhibit variation in their FWHMs. According to our physical model, the broad components used in the fits correspond to clouds that are clusters of subunits called clumps (see §4.2). The fact that individual components show changes in their widths may be interpreted in terms of changes in the internal structure of clouds or variations in the turbulent velocity field or both. In fact, Faucher-Giguere (2012) describes a mechanism for the formation of FeLoBALs in which a radiative shock wave propagating in a cloud shreds the cloud into cloudlets.

7.2.2. Optical depth variations

Optical depth variability occurs only in individual components of Si IV and CIV BAL troughs. None of the 10 quasars exhibits variability in all of its components, i.e. in its entire trough. Over corresponding velocities, Si IV exhibits a higher incidence of variability, which probably relates to different line strengths between the two ions. In particular, within the same object, C IV lines tend to be stronger than the corresponding Si IV lines at the same velocity shift. According to Capellupo et al. (2012), weaker lines are found to be more variable. Furthermore, C IV is usually saturated, thus small changes in the ionizing flux or small changes in column densities are not observable.

In J114704.46+153243.3, a high-velocity doublet has disappeared from the secondepoch spectra of both Si IV and C IV. On the other hand, J101056.69 + 355833.3 exhibits the emergence of two high-velocity broad and shallow doublets, evident in both Si IV and CIV. The disappearance/emergence of absorption components can be due to clouds moving into or out of our line of sight or ionization changes. However, in both quasars, none of the remaining doublets composing the Si IV and C IV BALs exhibits variations in each radial velocity, which weakens the moving-cloud scenario.

As mentioned above, none of the 10 quasars exhibits variability in all of its components, i.e. in its entire trough. Capellupo et al. (2012) argue that when variability occurs in selected portions (a few km/s wide) of absorption troughs, the mechanism responsible is the transverse motion of clouds in the line of sight. They also argue that changes in ionization should cause more global variations and not changes in small and discrete velocity intervals of BALs. According to these arguments, the variability of individual components of BALs presented by our sample seems to fit well in the moving cloud scenario.

However, there is a possibility that ionization changes can cause an effect where we observe only individual components varying. Let us consider a scenario in which BAL clouds are clumpy, they do not have the same density and the mechanism that causes the observed variations is the change in incident ionizing photons. The ionization parameter of each cloud depends on the fraction of incident photons relative to density and squared radius. Therefore, the densest regions will have a smaller ionization parameter and their response to increased/decreased photon energy will be less detectable or not detectable at all. Furthermore, absorption lines that are heavily saturated are less susceptible to small changes in ionization. Another simple case that can explain distinctive variations is the scenario in which there are clumps that may cover other clumps. The latter class of clumps would be shielded by closer-in clumps. Therefore, those shielded clumps will have relatively small effects of continuum variations and hence clumps at different radial velocities will show distinctive variations. As a result, variability of individual components of absorption troughs cannot provide a definitive answer as to whether variability is due to ionization changes or transverse motions of clouds in and out of the line of sight. At this point, we need to mention that we did not observe any changes in the radial velocities of components. If the transverse motion of clouds were responsible for the observed variability, we would expect to observe changes in the radial velocities of clouds. Thus, the moving-cloud scenario seems less possible.

7.2.2.1. Coordinated variations

We observed three types of coordinated variability: (1) all variable components within a BAL trough vary in concert (all strengthening or all weakening); (2) within the same object, Si IV and C IV components, over corresponding velocities, vary in concert; (3) both members of a doublet (Si $IV_b - Si IV_r, CIV_b - C IV_r$) vary in concert. The most likely explanation for (1) and (2) is global changes in ionization caused by fluctuations in quasar continuum flux (Hamann et al. 2011; Wang et al. 2015; He et al. 2017). For the third case, regardless of the variability mechanism involved, it is reasonable to expect coordinated variations between members of a doublet. Indeed, if the number of photons incident on a cloud changes, we would expect to observe coordinated changes between the members of a doublet. Also, if a cloud is moving into/out of our line of sight, it is possible to observe coordinated variations.

7.2.2.2. Non-coordinated variations

We observed three types of non-coordinated variability: (1) non-coordinated variations between components within a BAL (some components strengthen while others, at different velocities, weaken over time); (2) non-coordinated variations between Si IV and C IV components, at the same velocity, within the same quasar; (3) non-coordinated variations between the members of a doublet (Si $IV_b - Si IV_r$, C $IV_b - C IV_r$). Cases (1) and (2) can be interpreted in two ways. Non-coordinated variability can be caused by clouds moving in and out our line of sight. However, the lack of radial velocity variations observed in our sample weakens the moving cloud scenario. On the other hand, non-coordinated variations can be caused by changes in the ionization state of the gas, e.g. evolving gas density due to thermal instability (see Waters et al. 2017).

The most unexpected finding is non-coordinated variability between the members of a doublet. Our physical model could provide a possible explanation for this finding. We proposed that clouds are clusters of overlapping subunits called clumps (see Section 2.1). Thus, each cloud component is the superposition of narrow components produced by clumps. We suggest that non-coordinated variability between the members of a doublet may be due to variations exhibited by clumps, i.e. variations in the internal structure of clouds. Since our model is able to study clouds and not their internal structure, we are not able to probe the physical conditions of clumps, so our explanation is only a suggestion. Finally, it should be noted that discrepancies between the two members of a doublet can be caused due to (a) photons from the background emission source that are not absorbed and/or are scattered into the observer's line of sight, (b) local emission by absorbers and (c) geometric partial coverage of a continuum and/or BEL source by absorbing clouds. To conclude, non-coordinated variations between the members of a doublet could be caused by a mixed scenario involving a combination of the above mechanisms.

7.3. Clumpy vs Smooth & Homogeneous Outflow

Our analysis has revealed several pieces of evidence favoring the clumpy structure of quasar outflows over the smooth and homogeneous wind.

- 1. BALs consisting of complexes of narrow components motivate the idea that broad absorption troughs are the product of clumpy gas clouds with similar kinematics, locations and physical conditions. The clumpy structure of quasar outflows has been proposed by numerous studies (see §2.2.2.2).
- 2. The FWHMs of components, into which Si IV and C IV BALs are analyzed, are larger than the thermal and non-thermal widths. Therefore, we proposed (Stathopoulos et al. 2015) that clouds are not single coherent units, but clusters of sub-units called clumps.
- 3. Si IV and C IV components tend to increase their widths and decrease their optical depths with increasing outflow velocity. Low velocity components are characterized by large optical depths and small widths. On the other hand, high velocity components are characterized by small optical depths and large widths. This behavior points towards a scenario where the outflow close to the accretion disc is highly inhomogeneous and clumpy. As the outflow accelerates outwards, the cloud density drops as the velocity increases and the clumpy wind tends to evolve into a smooth wind. As the clouds accelerate outwards, they are shredded into smaller structures (clumps) accelerated at higher velocities. So, we expect high velocity components to have smaller optical depths.
- 4. All BALs in our sample exhibit independent variations of absorption components. Thus absorbing clouds vary independently. This is an indication of the distinction and independence of the clumps from each other.
- 5. In the vast majority of Si IV and C IV doublets we observe large deviations of the ratio τ_b/τ_r from the expected theoretical value. Furthermore, within the same BAL we observe doublets, at different velocities, characterized by different values of τ_b/τ_r . This suggests a wind structure in which clouds at different velocities (different distances from the black hole) exhibit different covering fractions.

6. Non-coordinated variability between the blue and red component within the same doublet favors the clumpy wind structure over the smooth and homogeneous outflow.

8. Conclusions

Applying the model of Danezis et al. (2003, 2007); Lyratzi et al. (2007) and the fitting criteria of Stathopoulos et al. (2015, 2019) using ASTA software (Tzimeas et al. 2019), we succeeded in decomposing the Si IV and C IV BALs, to the individual components they consist of. We are thus able to study the kinematics, physical conditions and variability of each absorber in the line of sight. The main results are the following:

- 1. Si IV and C IV BALs are complexes of narrow (compared to the BAL width) absorption components. Furthermore, Si IV and C IV BALs, within the same quasar, consist of the same number of absorption components.
- 2. In each quasar, Si IV and C IV BALs consist of the same number of absorption components. Each BAL trough arises from clumpy gas clouds which have similar locations, kinematic structure and physical conditions. Furthermore, Si IV and C IV originate in the same outflow clouds which are clusters of smaller structures (called clumps).
- 3. The components that Si IV and C IV BALs are analyzed into are broad compared to the thermal and microturbulent width and originate in clouds. This suggests that clouds are probably not single coherent entities but clusters of subunits, which means that clouds have a complex internal structure made of smaller clumps. The BAL trough formation mechanism is as follows: Each clump produces an absorption line the width of which depends on the thermal and microturbulent motion of ions inside each clump. The clump absorption lines are very close in velocity space thus overlapping and producing broad components which correspond to clouds. The broad cloud components blend among themselves producing the broad absorption troughs called BALs.
- 4. Within the same quasars, C IV and SI IV components at the same outflow velocity are characterized by < FWHM_{CIV}/FWHM_{SIIV} $>= 1.37 \pm 0.22$.
- 5. Optical depth ratios between the members of doublet deviate from the expected theoretical value. This result indicates that Si IV and C IV absorbers partially cover the continuum and/or BEL region.
- 6. There is no doubt that these components are intrinsic to the quasars as they exhibit time variability and anomalous optical depth ratios (indicative of partial coverage of the background source).
- 7. Within the same quasars we find Si IV and C IV components at the same outflow velocity which are characterized by τ_b/τ_r (Si IV) $\neq \tau_b/\tau_r$ (C IV). This result indicates that Si IV and C IV exhibit different covering fraction of the continuum source. It is possible that Si IV traces a different area of the outflowing cloud than C IV.
- 8. If solar abundances are assumed, then C IV should be more abundant than Si IV. As a result, we would expect C IV and Si IV components at the same outflow velocity

(within the same quasar) to be characterized by $\tau_{CIV} > \tau_{SIIV}$. However there are cases that the exact opposite happens. This means that either the assumption of solar abundances is not correct or that in those cases Si IV has larger covering fraction than C IV. Of course a mixed scenario cannot be ruled out.

- 9. Our variability study showed that:
 - a. We do not observe any evidence indicating acceleration or deceleration of absorbing clouds in the line of sight in a time interval between 6 to 13 years.
 - b. In the vast majority of cases the widths (FWHMs) of Si IV and C IV absorption components do not change over time. Few cases showing FWHM variations may be explained in terms of changes in the internal structure of clouds and/or changes in the turbulent velocity field or both.
 - c. The main cause of BAL variability is due to changes in the optical depths of individual Si IV and C IV components. Variability occurs only in individual components of Si IV and C IV BAL troughs. None of the ten quasars exhibits variability in all of its components i.e. in its entire trough.
 - d. Si IV and C IV absorption components present independent variations which is an indication for the distinction and independence of the clouds from each other.
 - e. Concerning the responsible mechanism for the observed variability, our results favour the ionization change scenario to be more dominant, as we did not observe any changes in the radial velocities of clouds. However, the possible contribution of the other mechanisms cannot be ruled out given the small size of our sample.
 - f. We did not observe any trend for greater incidence of variability at specific velocity ranges. The incidence of variability is independent of outflow velocity.
 - g. Si IV exhibits greater incidence of variability than C IV. This result can be attributed to: i) over corresponding velocities Si IV doublets are in general weaker than C IV doublets, ii) C IV is more likely to be saturated, iii) Si IV exhibits smaller covering fraction than C IV which means that Si IV traces a smaller area of the outflowing cloud than C IV.
- 10. Most results derived from our study are indicative of density stratification within the absorbing gas, suggesting that quasar outflows are far from being smooth and homogeneous. As a result, the clumpy wind model provides a more realistic interpretation for the formation of BALs.
- 11. Our proposed method of analyzing Si IV and C IV BALs, offers another way of resolving the clumpy structure of quasar outflows and studying each individual absorber in the line of sight.

Κεφάλαιο 1

Broad Absorption Line Quasars (BALQSOs)

1.1. Εισαγωγή

Ol quasars ή QSOs (Quasi Stellar Objects) αποτελούν μια υποομάδα των ενεργών γαλαξιακών πυρήνων (Active Galactic Nuclei-AGN) η οποία φέρει πολύ ενδιαφέροντα και ξεχωριστά φασματικά χαρακτηριστικά. Ol QSOs ξεχωρίζουν, μεταξύ των άλλων ενεργών γαλαξιών, εξαιτίας των εξαιρετικά υψηλών λαμπροτήτων τους (μεγαλύτερες από 10^{47} ergs s⁻¹~2.5 × 10^{13} L_☉, όπου L_☉ η ηλιακή λαμπρότητα) που είναι της τάξης των ~ $10^2 - 10^3$ φορές μεγαλύτερες από αυτές των συνηθισμένων λαμπρών γαλαξιών. Ol λαμπρότητες αυτές προέρχονται από περιοχές πολύ μικρού όγκου (~2 × 10^{14} cm ~ 3 × 10^3 R_☉ όπου R_☉ είναι η ακτίνα του Ήλιου).

Οι QSOs εκπέμπουν σε ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος, από τα ραδιοκύματα μέχρι τις ακτίνες X ή ακόμη και τις ακτίνες γάμμα. Παρόλα αυτά το μέγιστο της φασματικής κατανομής ενέργειας των quasars προέρχεται από την οπτική/υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η οπτική/ υπεριώδης ακτινοβολία, η οποία αντιστοιχεί περίπου στο ένα τρίτο της συνολικής εκπεμπόμενης ενέργειας των quasars, θεωρείται ότι προέρχεται από τον περιστρεφόμενο δίσκο προσαύξησης ο οποίος περιβάλει την υπερμεγέθη μελανή οπή μάζας ~10^{8–9} M_☉ (Lin & Papaloizou 1996, Ulrich et al. 1997, Mirabel & Rodriguez 1999) που εδράζεται στο κέντρο τους.

Το συνεχές των quasars στην υπεριώδη και οπτική περιοχή περιγράφεται από νόμο δύναμης της μορφής $F_v \propto v^{\alpha_v}$ όπου ο εκθέτης α_v ονομάζεται φασματικός δείκτης². Στα μήκη κύματος μεταξύ 350-1050 Å (Extreme UV-EUV) ο φασματικός δείκτης έχει μέση τιμή $\alpha_v = -1.96 \pm 0.15$ (Zheng et al. 1997) ενώ στην περιοχή μηκών κύματος 1050-7000 Å έχει μέση τιμή $\alpha_v = 0.99 \pm 0.05$ (Zheng et al. 1997). Βέβαια, οι Telfer et al. (2002), για την περιοχή μηκών κύματος ~300-1200 Å βρήκαν ότι $\alpha_v = -1.76 \pm 0.12$, ενώ οι Vanden Berk et al. (2002) για την περιοχή μηκών κύματος ~200-5000 Å βρήκαν ότι $\alpha_v = -0.46$. Το οπτικό/υπεριώδες συνεχές των quasars χαρακτηρίζεται από μια αλλαγή στην κλίση η οποία εμφανίζεται γύρω στα 1050 Å. Ως αποτέλεσμα το συνεχές σε ολόκληρη την περιοχή από 350-7000 Å, μπορεί να προσομοιωθεί με έναν σπασμένο νόμο δύναμης.

Ένα από τα κυριότερα φασματικά χαρακτηριστικά των quasars είναι ότι αυτοί, εκτός από στενές γραμμές εκπομπής (FWHM~400 – 500 km/s), επιδεικνύουν πλατιές γραμμές εκπομπής (Broad Emission Lines-BELs, Εικόνα 1.1) με εύρη 1000 km/s \leq FWHM \leq 25000 km/s (Peterson 1997, Strateva et al. 2003). Οι γραμμές αυτές είναι

 $^{{}^{2}}F_{\lambda} \propto \lambda^{\alpha_{\lambda}}$, όπου $\alpha_{\lambda} = -\alpha_{\nu} - 2 [\epsilon \pi \epsilon i \delta \eta F_{\lambda} d\lambda = F_{\nu} d\nu, c = \lambda \nu, d\lambda = d\nu (\lambda^{2}/c)]$

ιδιαίτερα έντονες, και στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος εμφανίζονται μέσω των ιόντων Lya, N V, Si IV, C IV, C III], Mg II και άλλα. Οι πλατιές γραμμές εκπομπής ενδέχεται να φέρουν υπερτιθέμενες στενές γραμμές με FWHM~200 – 2000 km/s.

Ένα ποσοστό ~20%-30% του συνολικού πληθυσμού των quasars εμφανίζει στα υπεριώδη φάσματά του πλατιές γραμμές απορρόφησης (Broad Absorption Lines-BALs) με FWHM > 2000 km/s (Turnshek 1984b; Weymann et al. 1991; Hewett & Foltz 2003; Reichard et al. 2003; Trump et al. 2006; Allen et al. 2011; Ganguly & Brotherton 2008; Knigge et al. 2008). Η περιοχή στην οποία δημιουργούνται αυτές οι φασματικές γραμμές καλείται Broad Absorption Line Region (BALR), ενώ οι εν λόγω quasars καλούνται BAL quasars ή BALQSOs.



Εικόνα 1.1. Στην εικόνα παρουσιάζονται οι σημαντικότερες πλατιές γραμμές εκπομπής των quasars που εμφανίζονται στην υπεριώδη/οπτική περιοχή του φάσματος, από τα ~1000-6000 Å (Peterson 1997).

1.2. Broad Absorption Line QSOs-BALQSOs

Ένα ποσοστό του συνολικού πληθυσμού των quasars, είτε ως αποτέλεσμα εξέλιξης (Surdej & Hutsemekers 1987, Becker et al. 2000, Giustini, Cappi & Vignali 2008) είτε εξαιτίας της γωνίας παρατήρησης (Turnshek et al. 1988, Junkkarinen 1983, Elvis 2000), μας δίνει τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε φυσικές διαδικασίες που σχετίζονται με το περιβάλλον της μελανής οπής. Πιο συγκεκριμένα, οι BALQSOs μέσω των πλατιών γραμμών απορρόφησης στο υπεριώδες, μας δίνουν τη δυνατότητα να έχουμε πρόσβαση στις εκροές υλικού οι οποίες προέρχονται από τον δίσκο προσαύξησης που αναπτύσσεται γύρω από την υπερμεγέθη μελανή οπή.

Οι BALQSOs αποτελούν έναν υποτύπο των radio-quite³ quasars και διακρίνονται από την εμφάνιση βαθιών και πλατιών γραμμών απορρόφησης, μεγάλης ακτινικής μετατόπισης, οι οποίες χαρακτηρίζονται από σύνθετα προφίλ. Οι γραμμές αυτές, όπως προαναφέρθηκε, καλούνται BALs (Broad Absorption Lines) και εμφανίζονται, στην πλειάδα των περιπτώσεων μετατοπισμένες προς την μπλε περιοχή του φάσματος σε σχέση με την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής. Απορροφήσεις μετατοπισμένες προς το μπλε προκύπτουν όταν οι απορροφητές εδράζονται μεταξύ της πηγής συνεχούς ακτινοβολίας και παρατηρητή και εκρέουν από την κεντρική περιοχή που τροφοδοτεί τον QSO. Παρόλα αυτά, έχουν παρατηρηθεί περιπτώσεις όπου η απορρόφηση εμφανίζεται ερυθρομετατοπισμένη ως προς την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής (βλέπε Hall et al. 2013). Στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζεται το φάσμα του BAL quasar J141546.24+112943.4 στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος μεταξύ ~1000-2200 Å.

Όλοι οι γνωστοί BALQSOs εμφανίζουν έντονη απορρόφηση στον C IV και έντονη με μέτρια απορρόφηση στο Si IV. Σχεδόν όλοι οι BALQSOs εμφανίζουν έντονες απορροφήσεις N V και O VI όταν βέβαια η ερυθρομεταθέσεις είναι αρκετά μεγάλες ώστε να υπάρχει φασματική παρατήρηση αυτών των ιόντων. Επίσης, η απορρόφηση της Lyα είναι συνήθως αρκετά ασθενέστερη από του N V ενώ κάποιες φορές δεν είναι καν ορατή. Συνήθως η απορρόφηση του Mg II είναι επίσης ασθενέστερη από αυτή του C IV, ενώ το Mg II είναι πάντοτε λιγότερο εκτεταμένο στο χώρο των ταχυτήτων από ότι ο C IV.



Εικόνα 1.2. Το φάσμα του quasar SDSS J141546.24+112943.4 από το οποίο έχει αφαιρεθεί η ερυθρομετάθεση. Στην εικόνα σημειώνονται οι σημαντικότερες πλατιές γραμμές εκπομπής. Αξιοσημείωτες είναι οι πλατιές γραμμές απορρόφησης των Si IV και C IV οι οποίες είναι μετατοπισμένες προς το μπλε σε σχέση με την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής.

³Radio-quite χαρακτηρίζονται εκείνοι οι quasars οι οποίο δεν εμφανίζουν έντονη ράδιο-εκπομπή. Προκειμένου να καθοριστεί ποιοι quasars θα χαρακτηρίζονται ως radio-quite ορίζεται η παράμετρος R (radio loudness) $R = L_{\nu}(5 \text{ GHz})/L_{\nu}(4400 \text{ Å}) = 1.36 \times 10^5 [L(5 \text{ GHz})/L(4400 \text{ Å})]$ όπου L(5GHz) και L(4400 Å) αντιπροσωπεύουν τις τιμές των λL_λ στις αντίστοιχες ενέργειες (Netzer, 2013).

1.2.1. Broad Absorption Lines (BALs)

Οι BALQSOs, στα υπεριώδη φάσματά τους, επιδεικνύουν φασματικά προφίλ τύπου P-Cygni, που οφείλονται σε μεταβάσεις όπως είναι οι C IV, Si IV, N V, Lyα, Mg II, O VI, P V, Al III. Τα P-Cygni προφίλ αυτών των γραμμών χαρακτηρίζονται από σύνθετες και πολύπλοκες γραμμές απορρόφησης ασυνήθιστα μεγάλου εύρους (~10000 km/s) και μεγάλης ακτινικής μετατόπισης (~30000 km/s) από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής με αποτέλεσμα να αποκαλούνται πλατιές κοιλάδες απορρόφησης (Broad Absorption troughs). Στην Εικόνα 1.3 παρουσιάζονται προς σύγκριση το φάσμα ενός non-BAL quasar και το φάσμα ενός BALQSO, στην περιοχή του C IV (λλ 1548.187, 1550.772 Å).



C IV λλ 1548.187, 1550.772 Å

Εικόνα 1.3. Σύγκριση του φάσματος ενός non-BAL με το φάσμα ενός BAL quasar, στην περιοχή του C IV μεταξύ 1450-1600 Å. Επάνω: το φάσμα του non-BAL quasar J005824.75+004113.3 στο οποίο είναι εμφανής η πλατιά γραμμή εκπομπής του C IV. Μετατοπισμένη προς την μπλε περιοχή του φάσματος εμφανίζεται μια στενή διπλέτα απορρόφησης του C IV. Κάτω: το φάσμα του BALQSO J113527.25+385744.1 στο οποίο εκδηλώνεται το φαινόμενο BAL. Πλην της πλατιάς γραμμής εκπομπής εκπομπής αξιοσημείωτη είναι η πλατιά γραμμή απορρόφησης η οποία χαρακτηρίζεται από πολύπλοκο και σύνθετο προφίλ όπως επίσης και από μεγάλη μετατόπιση προς την μπλε περιοχή του φάσματος.

Οι BAL κοιλάδες απορρόφησης, μέσω των UV P-Cygni προφίλ, αποτελούν την πιο εντυπωσιακή εκδήλωση των ισχυρών και ταχύτατων εκροών πλάσματος που πηγάζουν από τον δίσκο προσαύξησης που περιβάλει την υπερμεγέθη μελανή οπή που εδράζεται στο κέντρο τους.

Στις μελέτες των BALQSOs αποκαλύπτεται ένα μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών των BAL κοιλάδων απορρόφησης ως προς την ταχύτητα εκροής, το επίπεδο ιονισμού, τη δομή των κοιλάδων απορρόφησης και την ένταση της απορρόφησης. Οι ταχύτητες εκροής κυμαίνονται από 0 – 5000 km/s μέχρι 10000 – 30000 km/s ενώ έχουν παρατηρηθεί ακόμη πιο ακραίες περιπτώσεις όπου οι ταχύτητες φθάνουν τα

~60000 km/s (Foltz et al. 1983). Όσον αφορά τη δομή τους, οι BALs εμφανίζουν μεγάλη ποικιλομορφία. Στα φάσματα των BALQSOs απαντώνται BALs με ομαλά, τύπου P-Cygni, προφίλ τα οποία εκκινούν κοντά σε μηδενική ταχύτητα απομάκρυνσης από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής (Scargle et al. 1970, Turnshek 1988). Σε αυτές τις περιπτώσεις η απορρόφηση μπορεί να είναι είτε ρηχή είτε βαθιά. Ένας άλλος τύπος BALs περιλαμβάνει πολλαπλές κοιλάδες απορρόφησης με την απορρόφηση να εκκινεί κοντά σε μηδενική ταχύτητα εκροής (Turnshek et al. 1980, Turnshek 1988). Επίσης, παρατηρούνται περιπτώσεις όπου οι κοιλάδες απορρόφησης είναι αποκομμένες από την εκπομπή και δεν εκκινούν αν η εκροή δεν αγγίξει τα 3000 – 5000 km/s (~20% των περιπτώσεων, Turnshek et al. 1988). Τέλος υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι BALs είναι "σπασμένες" σε πολλαπλές και πλατιές συνιστώσες απορρόφησης (Turnshek 1988, Turnshek et al. 1988). Τα BAL προφίλ που εμφανίζουν πολλαπλές ή σπασμένες κοιλάδες απορρόφησης ερμηνεύονται ως συνέπεια διακριτών κατανομών ταχύτητας/ πυκνότητας (Turnshek et al. 1980, Turnshek 1984a, 1984b, Foltz et al. 1987, Braun & Milgrom 1990, Arav et al. 1999, Korista et al. 1993, deKool et al. 2001). Για την ερμηνεία του διακριτού χαρακτήρα των εκροών έχουν προταθεί διάφοροι μηχανισμοί όπως: διακριτά εκρηκτικά επεισόδια εκροής υλικού (Turnshek 1984a), το κλείδωμα των φασματικών γραμμών (absorption-absorption line locking-βλέπε § 2.2.2.2) ή διακριτές εκροές (Arav et al. 1999). Σε γενικές γραμμές δύο είναι οι ακραίες περιπτώσεις BAL κοιλάδων. Στο ένα άκρο συναντάμε ομαλές και συνεχείς πλατιές κοιλάδες απορρόφησης τύπου P-Cygni (PHL 5200,RS 23 και H1413+113) ενώ στο άλλο άκρο έχουμε την εμφάνιση περίπλοκων δομών με διακριτά χαρακτηριστικά απορρόφησης (Q 1303+308). Τα υπόλοιπα ΒΑL προφίλ που παρατηρούνται, όπως αποκολλημένες από την εκπομπή κοιλάδες απορρόφησης, πολλαπλές κοιλάδες απορρόφησης κ.α. κατατάσσονται μεταξύ αυτών των δύο ακραίων περιπτώσεων.

Για την ερμηνεία της μεγάλης ποικιλομορφίας των BAL προφίλ, ο Pereyra (2014) πρότεινε ότι αυτή οφείλεται στη γωνία παρατήρησης των BALQSOs. Παρατηρώντας τους BALQSOs υπό διαφορετικές γωνίες, από "face-on" σε "edge-on" θα παρατηρούμε σταδιακά πολλαπλές κοιλάδες απορρόφησης, στη συνέχεια αποκολλημένες κοιλάδες απορρόφησης, από την αντίστοιχη εκπομπή, και τέλος κλασικά τύπου P-Cygni προφίλ.

Ένα πολύ ιδιαίτερο και συνάμα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των BAL κοιλάδων απορρόφησης είναι ότι συνήθως αυτές είναι κορεσμένες⁴ χωρίς όμως να αγγίζουν τη μηδενική ροή (non-black saturation – βλέπε § 2.3). Το χαρακτηριστικό αυτό, στα φάσματα των BALQSOs, καταδεικνύει ότι οι απορροφητές δεν καλύπτουν πλήρως την πηγή της συνεχούς ακτινοβολίας ή/και την BEL περιοχή (φαινόμενο της μερικής κάλυψης της πηγής του συνεχούς ή και της BELR). Το φαινόμενο της μερικής κάλυψης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο τόσο στα προφίλ των γραμμών όσο και στο φυσικό μοντέλο της δομής της BAL περιοχής. Για τους λόγους αυτούς, η μερική κάλυψη και οι συνέπειές της εξετάζονται στην §2.3.

Στην Εικόνα 1.4 παρουσιάζονται παραδείγματα των ανωτέρω περιπτώσεων. Σημειώνεται ότι η μεγάλη ποικιλομορφία και η πολυπλοκότητα των BAL προφίλ αποτέλεσε το βασικό και αρχικό επιχείρημα ότι η BALs είναι το αποτέλεσμα της σύνθεσης επιμέρους συνιστωσών οι οποίες οφείλονται σε νέφη απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης.

⁴ Χαρακτηρίζονται από επίπεδο πυθμένα.



Εικόνα 1.4. Ο PHL 5200 αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα BALQSO ο οποίος φέρει ομαλή κοιλάδα απορρόφησης τύπου P-Cygni η οποία εκκινεί σε περίπου μηδενική ταχύτητα απομάκρυνσης από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής. Ο Q2240-370 φέρει πολλαπλές κοιλάδες απορρόφησης όπου η απορρόφηση εκκινεί κοντά σε μηδενική ταχύτητα εκροής. Ο Q1309-056 φέρει κοιλάδα απορρόφησης αποκομμένη από την εκπομπή >3000 km/s. Τέλος, ο Q0932+501 φέρει κοιλάδες απορρόφησης οι οποίες είναι "σπασμένες" σε ευδιάκριτες επιμέρους συνιστώσες (εικόνες από Turnshek 1988). Στην εικόνα, οι κάθετες και οριζόντιες γραμμές ορίζουν την έκταση των BALs.

Το χαρακτηριστικό εύρος των BALs είναι ~10000 km/s. Παρόλα αυτά, τα προφίλ των BALs, όπως προαναφέρθηκε, χαρακτηρίζονται από μεγάλη ποικιλομορφία. Προκειμένου λοιπόν να καθοριστεί ένας τρόπος σύμφωνα με τον οποίο μια πλατιά γραμμή απορρόφησης θεωρείται BAL, οι Weymann et al. (1991) καθόρισαν την μετρική Balnicity Index. Επί της ουσίας η εν λόγω μετρική μετρά το ισοδύναμο εύρος (σε km/s) εκείνων των φασματικών χαρακτηριστικών απορρόφησης τα οποία α) εκκινούν από ταχύτητες απομάκρυνσης < -3000 km/s, β) που είναι συνεχόμενα για πάνω από 2000 km/s και γ) δέχεται ως χαρακτηριστικά απορρόφησης εκείνα τα οποία πέφτουν 10% και περισσότερο κάτω από το συνεχές και δ) η απορρόφηση να εκτείνεται μέχρι τα - 25000 km/s ώστε να μην υπάρχει αλληλοεπικάλυψη με την πλατιά γραμμή εκπομπής του Si IV στα λλ 1393.755, 1402. 77 Å.

Με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη των τηλεσκοπίων και των τεχνικών παρατήρησης, παρατηρήθηκε μεγάλος αριθμός quasars ο οποίος έφερε πλατιές γραμμές απορρόφησης οι οποίες εκκινούσαν κοντά σε ταχύτητες >-3000 km/s τις οποίες η μετρική Balnicity Index δεν αναγνώριζε ως BALs. Έτσι, οι Hall et al. (2002), καθόρισαν μια νέα μετρική, που καλείται Absorption Index και αποτελεί τροποποίηση της μετρικής Balnicity Index. Η μετρική αυτή αναγνωρίζει απορροφήσεις οι οποίες εκκινούν από μηδενική ταχύτητα εκροής και πληρούν και όλα τα υπόλοιπα κριτήρια που τίθενται από την μετρική Balnicity Index. Με τη σειρά τους οι Trump et al. (2006) τροποποίησαν την μετρική των Hall et al. (2002) ώστε η απορρόφηση να δέχεται εύρη απορρόφησης μεγαλύτερα από 1000 km/s και η απορρόφηση να εκτείνεται μέχρι τα -29000 km/s από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής. Σημειώνεται ότι επειδή η πιο έντονη και χαρακτηριστική BAL είναι αυτή του C IV, οι ανωτέρω μετρικές καθορίστηκαν βάση αυτού του ιόντος. Έτσι, ένας quasar καθορίζονταν ως BALQSO αν η απορρόφηση του C IV χαρακτηριζόταν ως BAL βάση των μετρικών. Πλέον, οι μετρικές αυτές χρησιμοποιούνται και για άλλα ιόντα όπως το Si IV και το N V.

1.2.2. Η περιοχή των πλατιών γραμμών απορρόφησης (BALR)

Η περιοχή εντός της οποίας δημιουργούνται οι BALs καλείται Broad Absorption Line Region ή BALR. Από τα επίπεδα ιονισμού εκτιμάται ότι η θερμοκρασία της BALR είναι της τάξης των $10^4 - 10^5$ K. Η πυκνότητα στήλης του ουδέτερου υδρογόνου εκτιμάται ότι είναι N_H~ $10^{22} - 10^{24}$ cm⁻² (Mathur, Elvis, & Singh 1996, Gallagher et al. 1999), η μάζα της περιοχής είναι της τάξης των 10^3 M_☉ (Capellupo et al. 2014) και η πυκνότητα των ηλεκτρονίων στην BAL περιοχή υπολογίζεται ότι είναι n_e ≥ 10^6 cm⁻³. Αν η πυκνότητα ήταν μικρότερη τότε θα περιμέναμε να παρατηρούμε πλατιές γραμμές [O III]⁵ στα φάσματα των BALQSOs, κάτι που δεν συμβαίνει (Turnshek 1995).

⁵ Το [O III] αποτελεί απαγορευμένη μετάβαση. Η ταξινόμηση σε επιτρεπόμενες, ημι-απαγορευμένες και απαγορευμένες μεταβάσεις γίνεται είτε βάση της πιθανότητας πραγματοποίησης μιας μετάβασης είτε βάση του μέσου χρόνου για να επιτευχθεί μια αυθόρμητη ακτινοβολιακή μετάβαση. Οι επιτρεπόμενες μεταβάσεις αντιστοιχούν σε ακτινοβολία ηλεκτρικού διπόλου, η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλη πιθανότητα ενώ ο χρόνος ζωής της διεγερμένης κατάστασης είναι μόλις 10⁻⁸ sec. Για τις απαγορευμένες μεταβάσεις, οι χρονικές κλίμακες είναι πολύ μεγαλύτερες, κοντά στο 1 sec, επειδή η κβαντομηχανική πιθανότητα μετάβασης είναι πολύ μικρότερη. Οι ημι-απαγορευμένες μεταβάσεις χαρακτηρίζεται του μέσου χρόνους ζωής του χρόνοι του του αυθορμητη ακτινοβολιακή μετάβαση και από μεγάλη πιθανότητα ενώ ο χρόνος ζωής της διεγερμένης κατάστασης είναι μόλις 10⁻⁸ sec. Για τις απαγορευμένες μεταβάσεις, οι χρονικές κλίμακες είναι πολύ μεγαλύτερες, κοντά στο 1 sec, επειδή η κβαντομηχανική πιθανότητα μετάβασης είναι πολύ μικρότερη. Οι ημι-απαγορευμένες μεταβάσεις χρόνους ζωής του δύο προηγούμενων τιμών.

Ένα διεγερμένο άτομο μπορεί να μεταβεί στην θεμελιώδη του κατάσταση (ή μια οποιαδήποτε κατάσταση μικρότερης ενέργειας) είτε μέσω αυθόρμητης εκπομπής ενός φωτονίου ή χάνοντας ενέργεια εξαιτίας των συγκρούσεων με άλλα άτομα. Η πιθανότητα για μια ακτινοβολιακή μετάβαση καθορίζεται από ατομικές παραμέτρους, ενώ η συγκρουσιακή αποδιέγερση εξαρτάται από την πυκνότητα του αερίου. Αν η πυκνότητα του αερίου είναι υψηλή, ο μέσος χρόνος μεταξύ δύο συγκρούσεων είναι κατά πολύ μικρότερος από το μέσο χρόνο ζωής των απαγορευμένων ή ημιαπαγορευμένων ακτινοβολιακών μεταβάσεων. Ως αποτέλεσμα, τα αντίστοιχα φωτόνια δεν παρατηρούνται (για να είναι παρατηρήσιμες οι απαγορευμένες μεταβάσεις, θα πρέπει η πυκνότητα του αερίου να είναι πολύ μικρή και τόσο μικρές πυκνότητες δεν μπορούν να επιτευχθούν στο εργαστήριο).

Θεωρητικά μοντέλα εκροών υπολογίζουν την BALR να βρίσκεται σε ένα μεγάλο εύρος αποστάσεων με αποτέλεσμα το μέγεθος της BAL περιοχής να παραμένει ένα ανοιχτό ερώτημα. Στα μοντέλα ανέμων των Drew και Gidding (1982), Drew & Boksenberg (1984), Murray & Chiang (1997) η BALR εκτείνεται σε μια περιοχή απόστασης 0.01-0.03 pc, στο μοντέλο των Turnshek (1985) αυτή η απόσταση είναι της τάξης του μεταξύ 1 pc-1 kpc, στο μοντέλο δικωνικού ανέμου του Elvis (2000) υπολογίζει πως η BALR ξεκινά σε απόσταση μερικών pc από την μελανή οπή ενώ στο μοντέλο των Weymann et al. (1982) η απόσταση της BALR ξεπερνά το 1 kpc. Επίσης, μοντέλα φωτοϊονισμού καταδεικνύουν ότι η BAL περιοχή βρίσκεται σε αποστάσεις 30-500 pc από την μελανή οπή (Turnshek 1995). Από παρατηρησιακής πλευράς στα φάσματα των BALQSOs η πλατιά απορρόφηση του N V συνήθως επικαλύπτει την πλατιά εκπομπή της Lyα. Από το γεγονός αυτό υπολογίζεται ότι η BAL περιοχή βρίσκεται μακρύτερα από την BEL περιοχή και ότι η ελάχιστη απόσταση της BALR από τον κεντρικό πυρήνα είναι 0.1 pc (Turnshek 1995).

Η απουσία απαγορευμένων μεταβάσεων, στα φάσματα των ενεργών γαλαξιών, χρησιμοποιείται ώστε να τεθεί ένα κάτω όριο της πυκνότητας του αερίου ενώ η εμφάνιση ημι-απαγορευμένων γραμμών μπορεί να δώσει ένα άνω όριο της πυκνότητας.

Κεφάλαιο 2

Οι εκροές των BALQSOs

2.1. Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, οι πλατιές γραμμές απορρόφησης, τύπου P-Cygni, μεγάλης ακτινικής μετατόπισης, προς την μπλε περιοχή του φάσματος ως προς την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής, καταδεικνύουν ότι από τον δίσκο που περιβάλει την κεντρική μελανή οπή, πηγάζουν ισχυρές εκροές πλάσματος με ταχύτητες που αγγίζουν τα 0.1 c. Το υλικό που προκαλεί τις έντονες, πλατιές και πολύπλοκες γραμμές απορρόφησης θεωρείται ότι προέρχεται από αυτές τις εκροές. Οι φυσικές ιδιότητες, η δομή και η κινηματική του BAL υλικού δεν είναι σαφώς καθορισμένες και παραμένουν, για δεκαετίες, ένα ανοιχτό ερώτημα.

Η μία περίπτωση είναι ότι οι BALs, είναι το προϊόν ενός ομαλού, συνεχούς και ομοιογενούς ανέμου (Scargle et al. 1970, Drew & Gidding 1982, Shlosman & Vitello 1993, Murray et al. 1995, Fukumura et al. 2018). Στον αντίποδα συναντάμε τα μοντέλα πυκνωμάτων (clumpy wind models) σύμφωνα με τα οποία οι BALs είναι το προϊόν μιας εκροής η οποία δεν είναι ομαλή και ομοιογενής αλλά στο εσωτερικό της αναπτύσσονται επιμέρους δομές πλάσματος οι οποίες καλούνται νέφη, συμπυκνώσεις, πυκνώματα (Turnshek 1984b; Lyratzi et al. 2009, 2010c, 2011; Hamann et al. 2013; Takeuchi et al. 2013, 2014; Capellupo et al. 2012, 2014; Misawa et al. 2014, 2016;, Stathopoulos et al. 2015, 2017, 2019; Moscibrodzka & Proga 2013; Proga et al. 2014; Proga & Waters 2015; Waters & Proga 2016).

Έχουν προταθεί διάφορα θεωρητικά μοντέλα τα οποία προσπαθούν να εξηγήσουν τις ισχυρές εκροές πλάσματος των quasars ενώ διάφορες δυνάμεις έχουν χρησιμοποιηθεί προκειμένου να ερμηνευθεί η πρόκληση της εκροής. Τέτοιες δυνάμεις είναι:

- πίεση του αερίου (Weymann et al. 1982) με αποτέλεσμα την πρόκληση ενός θερμικού ανέμου⁶.
- μαγνητοϋδροδυναμικές ή μαγνητοφυγοκεντρικές (magnetocentrifugal) δυνάμεις (Blandford & Payne 1982, Emmering et al. 1992; Konigl & Kartje 1994, Fukumura et al. 2010).

⁶ Ο δίσκος προσαύξησης, θερμαίνεται μέσω ακτινοβόλησης των εξωτερικών και ψυχρότερων στρωμάτων του από την ακτινοβολία του εσωτερικού και θερμότερου δίσκου. Οι ακτίνες Χ τείνουν να θερμαίνουν το, χαμηλής πυκνότητας, αέριο σε θερμοκρασίες ~10⁷ Κ. Σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες, η άνω ατμόσφαιρα του δίσκου αναμένεται είτε να φουσκώνει προς σχηματισμό μιας στατικής κορόνας είτε να παράγει έναν θερμικό άνεμο, το οποίο εξαρτάται από το αν η θερμική ταχύτητα υπερβαίνει την τοπική ταχύτητα διαφυγής.

 η ακτινοβολιακή πίεση εξαιτίας των φασματικών γραμμών (line driven outflows⁷, Proga et al. 2000 και αναφορές εντός).

Η όποια κατανόηση έχουμε επί της πρόκλησης του ανέμου πηγάζει σε πρώτη φάση από τα μοντέλα ανέμων των θερμών αστέρων που μελετώνται για πολλές δεκαετίες.

2.2. Από τα ομαλά μοντέλα ανέμων στα μοντέλα πυκνωμάτων

2.2.1.Οι άνεμοι των θερμών αστέρων

Ιστορικά, το κίνητρο για την ανάπτυξη μοντέλων ανέμων, στην περίπτωση των quasars και των AGN, ήταν τα μοντέλα ανέμων των θερμών αστέρων (Proga 2007). Για παράδειγμα, οι Ο, Β, Οe και Be αστέρες όπως και οι Wolf Rayet χαρακτηρίζονται από ένα έντονο υπεριώδες πεδίο ακτινοβολίας και φέρουν στα υπεριώδη φάσματά τους P-Cygni προφίλ με έντονες και πλατιές απορροφήσεις, μετατοπισμένες προς την μπλε περιοχή του φάσματος, από μεταβάσεις όπως C IV, Si IV, N V. Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά καταδεικνύουν ότι η πίεση της ακτινοβολίας που επενεργεί στις γραμμές συντονισμού είναι η κινητήριος δύναμη πίσω από την πρόκληση της εκροής (Lamers & Cassinelli 1999 και αναφορές εντός). Οι εκροές αυτού του τύπου εμφανίζονται και στους κατακλυσμιαίους μεταβλητούς αστέρες (Cataclysmic Variables - CVs), οι οποίο εμφανίζουν το φαινόμενο της προσαύξησης. Στην περίπτωση των CVs η πιο θεαματική εκδήλωση των εκροών προέρχεται από τα P-Cygni προφίλ φασματικών γραμμών του υπεριώδους όπως είναι ο C IV (Cordova & Mason 1982).

Οι άνεμοι των θερμών αστέρων μελετώνται για πάνω από 50 χρόνια. Ιστορικά, η κεντρική ιδέα πίσω από τους line driven ανέμους, χρονολογείται από το 1926 με τη μελέτη του Milne (1926⁸) αλλά και το έργο του Sobolev (1957, 1960). Η εφαρμογή της θεωρίας των line-driven ανέμων, στους θερμούς αστέρες οφείλεται στους Lucy & Solomon (1970) και Castor, Abbott & Klein (1975). Όμως, το μοντέλο των Lucy & Solomon (1970) έδινε ρυθμούς απώλειας μάζας αρκετά μικρότερους από αυτούς που υπολογίζονταν μέσω των παρατηρησιακών δεομένων. Σε αντίθεση, το μοντέλο των Castor, Abbott & Klein (1975), κατάφερε να παρέχει μεγαλύτερη σύγκλιση μεταξύ θεωρίας και παρατηρήσεων. Βελτιώσεις στα δύο ανωτέρω μοντέλα πραγματοποιήθηκαν από τους Friend & Castor (1983), Abbott & Lucy (1985), Friend & Abbott (1986), Pauldrach et al. (1986), Puls (1987), Lucy & Abbott (1993). Το εν λόγω

⁷ Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, το αέριο στην επιφάνεια του δίσκου προσαύξησης επιταχύνεται επειδή απορροφά, την προερχόμενη από το δίσκο, υπεριώδη ακτινοβολία, μέσω δέσμιων-δέσμιων μεταβάσεων (το ηλεκτρόνιο πραγματοποιεί μεταβάσεις μεταξύ δέσμιων καταστάσεων σε ένα άτομο ή ιόν). Το αποτέλεσμα είναι η μεταφορά ορμής από το πεδίο ακτινοβολίας στο απορροφών αέριο.

⁸ Η ιδέα ότι από έναν αστέρα είναι δυνατόν να εκτινάσσεται υλικό μέσω σκέδασης και απορρόφησης της ακτινοβολίας προτάθηκε πρώτη φορά από τον Milne (1926) ο οποίος βρήκε ότι η δύναμη της ακτινοβολίας εξαιτίας της σκέδασης και απορρόφησης στις φασματικές γραμμές ιόντων μπορεί να υπερνικήσει τη δύναμη της βαρύτητας. Επίσης, βρήκε ότι οι φασματικές γραμμές μπορούν να μετατοπιστούν κατά Doppler σε μεγάλες ταχύτητες απομάκρυνσης από τον αστέρα.

μοντέλο, αποκαλούμενο και ως καθιερωμένο μοντέλο των line-driven ανέμων, θεωρεί ότι ο άνεμος είναι στατικός, ομοιογενής (στο εσωτερικό δεν του εμφανίζονται πυκνώματα ή ωστικά κύματα ή αστάθειες) και σφαιρικά συμμετρικός. Παρά την επιτυχία του καθιερωμένου μοντέλου στο να υπολογίζει τιμές παραμέτρων κοντά στις μέσες τιμές παραμέτρων προερχόμενων από μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων, υπάρχουν πολύ ισχυρά στοιχεία, τόσο θεωρητικά όσο και παρατηρησιακά που καταδεικνύουν ότι οι άνεμοι των θερμών αστέρων δεν είναι ομαλοί και ομοιογενείς αλλά εν αντιθέσει είναι, έντονα, χρονικά και χωρικά μεταβαλλόμενοι.

Τα παρατηρησιακά στοιχεία τα οποία καταδεικνύουν ότι οι εν λόγω άνεμοι δεν είναι ομαλοί και ομοιογενείς, αλλά είναι εντόνως μεταβαλλόμενοι και στο εσωτερικό τους εμφανίζουν δομές και πυκνώματα, είναι: α) η εκπομπή ακτίνων X⁹ (Harnden et al. 1979, Seward et al. 1979, Cassinelli & Swank 1983), β) η μη θερμική ράδιο εκπομπή¹⁰ (Abbott et al. 1984), γ) οι κορεσμένες γραμμές απορρόφησης που αγγίζουν την μηδενική ροή¹¹ (black saturation, Lucy 1982a), δ) οι διακριτές συνιστώσες απορρόφησης (Discrete Absorption Components-DACs¹²) που εμφανίζονται στα υπεριώδη μήκη κύματος (Lamers & Morton 1976, Bates and Halliwell 1986, Prinja et al. 1987, Prinja & Howarth 1988, Danezis, 1984, 1986; Danezis et al., 1991, 1992, 2003, 2005, 2007, 2009, 2010; Lyratzi, 2005; Lyratzi et al., 2003, 2007; Antoniou et al. 2010, 2011a, 2011b, 2014) οι δορυφορικές συνιστώσες απορρόφησης (Satellite Absorption Components-SACs¹³), (Danezis et al., 1991, 1992, 2003, 2005, 2007, 2009, 2010; Lyratzi, 2005; Lyratzi et al., 2003, 2005, 2007; Antoniou et al. 2010, 2011a, 2011b, 2014). Για περισσότερες πληροφορίες και θεωρητική ανάλυση των ανωτέρω επιχειρημάτων

¹⁰Σε ένα ποσοστό ~30% των θερμών αστέρων παρατηρείται μη θερμική ράδιο-εκπομπή (White & Becker 1983, Abbott et al. 1984) η οποία ερμηνεύεται μέσω της ανάπτυξης ωστικών κυμάτων εντός του ανέμου (Chen & White 1994).

⁹Οι Harnden et al (1979), Seward et al. (1979) βρήκαν μέσω παρατηρήσεων ότι όλοι οι Ο αστέρες εκπέμπουν στις μαλακές ακτίνες Χ. Πλέον θεωρείται κοινός αποδεκτό ότι η εκπομπή ακτίνων από τους Ο αστέρες οφείλεται στην ανάπτυξη και διάδοση ωστικών κυμάτων εντός του αστρικού ανέμου (Lucy & White 1980, Lucy 1982b, Cassinelli & Swank 1983, McFarlane & Cassinelli 1989). Τα ωστικά κύματα θεωρείται ότι είναι αποτέλεσμα υδροδυναμικών ασταθειών που εμφανίζονται στους ανέμους που προκαλούνται από την πίεση της ακτινοβολίας (Owocki et al. 1988, Owocki 1991). Οι Feldmeier et al. (1997) υπέθεσαν την ύπαρξη διαταραχών στη βάση του ανέμου οι οποίες οφείλονται στην τυρβώδη ροή της φωτόσφαιρας και την ύπαρξη ηχητικών κυμάτων τα οποία εμφανίζουν μεταβολές ως προς την ταχύτητά τους και την πυκνότητά τους. Οι μεταβολές αυτές ενισχυόμενες μέσω ακτινοβολιακών ασταθειών πον ποι στοία όταν συγκρούονται δημιουργούν περιοχές πυκνού και θερμού αερίου οι οποίες εκπέμπουν στις ακτίνες Χ.

¹¹Οι Lucy (1982a) και Lucy & Abbott (1983) έδειξαν ότι οι κορεσμένες απορροφήσεις γραμμών συντονισμού των UV P-Cygni προφίλ μπορούν να ερμηνευθούν με καλύτερο τρόπο αν θεωρηθεί ότι το πεδίο ταχύτητας του ανέμου είναι μη μονοτονικό. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την μη ομαλότητα των ανέμων.

¹²Διακριτές συνιστώσες απορρόφησης υπερτιθέμενες στις μη κορεσμένες κοιλάδες απορρόφησης των P-Cygni προφίλ γραμμών συντονισμού στα υπεριώδη μήκη κύματος. Η ύπαρξη αυτών των συνιστωσών και η μεταβλητότητά τους καταδεικνύουν την ύπαρξη πυκνωμάτων εντός του ανέμου.

¹³ Ενώ οι DACs είναι διακριτές φασματικές γραμμές και εύκολα παρατηρίσιμες, τα φάσματα των Ο, Β, Οε και Be αστέρων παρουσιάζουν και πλατιές γραμμές απορρόφησης, οι οποίες εκτείνονται σε ταχύτητες έως και 3000 km/s, με κορεσμένα προφίλ τα οποία δεν αγγίζουν την μηδενική ένταση. Για την ερμηνεία των εν λόγω γραμμών προτάθηκε (Danezis et al. 2003) το φαινόμενο SACs σύμφωνα με το οποίο όταν οι διακριτές συνιστώσες έχουν μεγάλα εύρη και είναι κοντά μεταξύ στον χώρο των ταχυτήτων, υπερτίθενται μεταξύ τους δημιουργώντας πλατιές και πολύπλοκες γραμμές απορρόφησης.

προτείνονται τα πρακτικά του συνεδρίου "Clumping in Hot Star Winds" (Hamann, W-R. et al. 2008) που όπως υποδηλώνει και το όνομά του ήταν αφιερωμένο στην μη ομαλή δομή (δομή που περιέχει πυκνώματα) των ανέμων των θερμών αστέρων. Βέβαια, ανατρέχοντας στο παρελθόν μπορεί να διαπιστωθεί ότι από τις πρώτες κιόλας μελέτες (Milne 1926, Lucy & Solomon 1970) έχει προταθεί ότι οι line-driven εκροές θα πρέπει να είναι δυναμικά ασταθείς. Η βασική ιδέα είναι ότι οι άνεμοι όλων των θερμών αστέρων λόγω ακτινοβολιακών ασταθειών αναπτύσσουν στο εσωτερικό τους δομέςπυκνώματα (clumps) διαφόρων κλιμάκων μεγέθους. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την θεωρητική ανάλυση των ασταθειών στους ανέμους των θερμών αστέρων και την ανάπτυξη πυκνωμάτων προτείνονται τα πρακτικά του συνεδρίου "Clumping in Hot Star Winds" (Hamann, W-R, et al. 2008).

Το συμπέρασμα, που προκύπτει είναι ότι η θεωρία των ομαλών και ομοιογενών ανέμων αποτελεί μια πολύ καλή πρώτη προσέγγιση του φαινομένου αλλά απέχει πολύ από την πραγματικότητα. Χαρακτηριστικά είναι τα λόγια του Moffat (2008) σε εργασία του δημοσιευμένη στο συνέδριο "Clumping in Hot Star Winds":«*Τα χρόνια πριν το 1990* οι άνεμοι των θερμών αστέρων θεωρούνταν ομαλοί, ένα γεγονός που έκανε τη ζωή των αστροφυσικών αρκετά εύκολη και δεν απασχολούσε ιδιαίτερα κανέναν. Έπειτα από πολύ περίεργες συμπεριφορές που παρατηρήθηκαν μέσω χρονικής μεταβλητότητας σε μελέτες πολωσιμετρίας μεμονωμένων αστέρων και μέσω περεταίρω ανάπτυξης της *CCD τεχνολογίας αποκαλύφθηκε ότι οι άνεμοι απέχουν κατά πολύ από τα είναι ομαλοί*».

Για τους ανωτέρω λόγους, οι Danezis et al. (2003, 2007) και Lyratzi et al. (2007) πρότειναν ότι οι πλατιές γραμμές απορρόφησης των θερμών αστέρων (Ο, Β) και των θερμών αστέρων εκπομπής (Oe, Be), που εμφανίζονται στα υπεριώδη μήκη κύματος, είναι το αποτέλεσμα σύνθεσης επιμέρους συνιστωσών οι οποίες δημιουργούνται σε νέφη απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης. Προκειμένου να μελετήσουν αυτές τις φασματικές γραμμές, οι Danezis et al. (2003, 2007) και Lyratzi et al. (2007) κατασκεύασαν το μοντέλο GR (βλέπε § 4.3.) σύμφωνα με το οποίο οι DACs και SACs μπορούν αν μελετηθούν ως σύνθεση πολλαπλών συνιστωσών. Το εν λόγω μοντέλο εφαρμόστηκε σε μια σειρά μελετών των Oe και Be αστέρων στις οποίες υπολογίστηκαν οι ταχύτητες απομάκρυνσης και οι πυκνότητες στήλης των νεφών, τα οπτικά τους βάθη όπως και εύρη των συνιστωσών, που προκαλούνται από τα εν λόγω νέφη (Danezis et al., 1991, 1992, 2003, 2005, 2007, 2009, 2010; Lyratzi, 2005; Lyratzi et al., 2003, 2005, 2007; Antoniou et al. 2010, 2011a, 2011b, 2014).

2.2.2.Οι άνεμοι των quasars

Όπως και στην περίπτωση των ανέμων των θερμών αστέρων έτσι και στους quasars, θεωρήθηκε, ως πρώτη προσέγγιση, ότι οι πανίσχυρες εκροές ήταν ομαλές και ομοιογενείς (π.χ. Scargle et al. 1970; Drew & Gidding, 1982; Drew & Boksenberg 1983; Shlosman & Vitello 1993; Murray et al. 1995; Higginbottom et al. 2013; Matthews et al. 2016; Fukumura et al. 2018). Βέβαια, κατά τη σύγκριση των quasars με τους θερμούς αστέρες συναντάμε πολλές ουσιαστικές διαφορές όπως είναι η περιστροφή γύρω από έναν δίσκο προσαύξησης, η μη ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας του δίσκου, η αυξανόμενη βαρυτική δύναμη στην ατμόσφαιρα του δίσκου, οι πολύ χαμηλότερες πυκνότητες των σωματιδίων, η επίδραση των ακτίνων X από το ενδότερο μέρος του δίσκου προσαύξησης και τέλος η υπερμεγέθης μελανή οπή. Υπάρχει επίσης και η θεμελιώδης διαφορά ως προς την γεωμετρία καθώς ενώ οι άνεμοι των θερμών αστέρων θεωρούνται, με πολύ καλή προσέγγιση, σφαιρικά συμμετρικοί, οι άνεμοι των quasars είναι στην καλύτερη περίπτωση αξονικά συμμετρικοί και πηγάζουν από έναν επίπεδο δίσκο.

2.2.2.1. Μοντέλα ομαλών ανέμων

Επειδή οι δύο πρώτοι BALQSOs που παρατηρήθηκαν ήταν ο PHL 5200 (βλέπε Εικόνα 1.4) και ο RS23 οι οποίοι έφεραν πλατιά αλλά ομαλά P-Cygni προφίλ, οι πρώτες προσπάθειες ερμηνείας του BAL φαινομένου ήταν μέσω ενός ομαλού, συνεχούς ανέμου. Οι Scargle et al. (1970) κατασκεύασαν ένα θεωρητικό μοντέλο ομαλού ανέμου, ο οποίος οφείλονταν αποκλειστικά και μόνο στη σκέδαση των φωτονίων. Το μοντέλο ήταν ικανό να αναπαράγει θεωρητικά τα P-Cygni προφίλ των γραμμών Si IV και C IV των δύο πρώτων BALQSOs που ανακαλύφθηκαν (PHL 5200 και RS23) αλλά αποτύγχανε στο να ερμηνεύει πιο σύνθετα προφίλ απορρόφησης τα οποία προερχόντουσαν από την ανακάλυψη όλο και περισσότερων BALQSOs.

Οι Drew & Gidding (1982) κατασκεύασαν ένα θεωρητικό μοντέλο σφαιρικά συμμετρικού και ομαλού ανέμου, το οποίο παρήγαγε θεωρητικά P-Cygni προφίλ. Το εν λόγω μοντέλο δεν μπορούσε να περιγράψει πιο περίπλοκα προφίλ απορρόφησης, τα οποία δεν είναι ομαλά αλλά αποτελούνται από διακριτά φασματικά χαρακτηριστικά (βλέπε Εικόνα 1.4. Q1309-056, Q0932+501) ούτε και την απότομη κόκκινη πτέρυγα της απορρόφησης που εμφανίζουν φάσματα του τύπου PHL 5200.

Κατά αναλογία με τους θερμούς αστέρες, οι Drew & Boksenberg (1984) κατασκεύασαν ένα μοντέλο σφαιρικά συμμετρικών ανέμων με παράγοντα πλήρωσης (filling factor¹⁴) ίσο με μονάδα. Το εν λόγω μοντέλο όμως δεν μπορούσε να ερμηνεύσει τις πολύ μεγάλες ταχύτητες απομάκρυνσης που εμφανίζουν οι BALs, ενώ επίσης χαρακτηρίζονταν από πολύ υψηλές παραμέτρους ιονισμού-περίπου 4 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από ότι τα μοντέλα νεφών. Εν συνεπεία, απαιτούνταν πολύ υψηλότερες πυκνότητες στήλης- περίπου 6 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες, ώστε να αναπαράγονται οι παρατηρούμενες γραμμές Si IV.

Οι Shlosman & Vitello (1993), βασισμένοι στη θεωρία των ομαλών ανέμων των θερμών αστέρων, πρότειναν ένα κινηματικό μοντέλο για έναν άνεμο ο οποίος πηγάζει από τον δίσκο προσαύξησης, είναι ομαλός και δικωνικός. Σημειώνεται ότι το εν λόγω μοντέλο κατασκευάστηκε προκειμένου να ερμηνεύσει τα ομαλά P-Cygni προφίλ με αποτέλεσμα να είναι ανεπαρκές στην περίπτωση πιο περίπλοκων και σύνθετων απορροφήσεων. Το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση φασμάτων quasar και άλλων AGN από τους Higginbottom et al., (2013), Matthews et al., (2016), Yong et al., (2016).

Οι Arav & Li (1994), Arav, Li & Begelman (1994) εφάρμοσαν πρώτοι τη θεωρία των line-driven ανέμων στην περίπτωση των quasars και έδειξαν θεωρητικά ότι η πίεση της ακτινοβολίας είναι δυνατόν να παράγει εκροές οι οποίες παρατηρούνται μέσω των

¹⁴Αν θεωρήσουμε ότι η περιοχή που παράγει τις BALs έχει ένα συγκεκριμένο όγκο V_{BALR} τότε ο παράγοντας πλήρωσης είναι το κλάσμα του όγκου της BALR περιοχής που καταλαμβάνει το αέριο το οποίο προκαλεί τις απορροφήσεις. Για παράδειγμα είναι δυνατόν η BALR να μην είναι ομοιογενώς γεμάτη με αέριο.

BALs. Στη συνέχεια, οι Murray et al. (1995) πρότειναν ένα μοντέλο στο οποίο ένας ομαλός άνεμος πηγάζει από τον δίσκο προσαύξησης με ακτίνα εκτόξευσης $\sim 10^{16}$ cm. Ο άνεμος προέρχεται από το ισημερινό επίπεδο, έχει γωνία ανοίγματος 5° και επιταχύνεται ακτινοβολιακά αποκτώντας τερματική ταχύτητα 0.1c. Το μοντέλο αυτό μπορούσε να προβλέψει αρκετά ικανοποιητικά διάφορα χαρακτηριστικά των BAL και non-BAL QSOs όπως την εμφάνιση BELs ιόντων υψηλού βαθμού ιονισμού για όλες τις γωνίες παρατήρησης, το μέγεθος της BEL περιοχής, την παράμετρο ιονισμού της BEL περιοχής και την έντονη απορρόφηση στις ακτίνες Χ. Επίσης το μοντέλο προβλέπει πως αν ο quasar παρατηρείται μέσω του ανέμου, τότε εμφανίζονται στο φάσμα του μετατοπισμένες προς το μπλε, πλατιές γραμμές απορρόφησης, με ομαλά προφίλ, κυρίως των μεταβάσεων C IV, Ο VI, Ne VIII και Lyα. Παρόλα αυτά, το εν λόγω μοντέλο αποτυγχάνει να ερμηνεύσει τα σύνθετα προφίλ απορρόφησης, τις διακριτές κοιλάδες απορρόφησης και τις αποκομμένες από την εκπομπής BALs για μερικές χιλιάδες km/s. Επίσης, στο μοντέλο τους οι Murray et al. (1995) προσπαθώντας να ερμηνεύσουν τις BALs μέσω ενός ακτινοβολιακά επιταχυνόμενου ανέμου, ο οποίος εμφανίζει παράγοντα πλήρωσης (filling factor) ίσο με μονάδα (δηλαδή χωρίς την ύπαρξη νεφών), προέβησαν σε δύο υποθέσεις που αποκλίνουν κατά πολύ από το καθιερωμένο μοντέλο. Η πρώτη είναι ότι η BAL περιοχή είναι κατά έναν παράγοντα 100 μικρότερη και ότι η παράμετρος ιονισμού¹⁵ της BAL περιοχής είναι 100 φορές μεγαλύτερη. Μία συνέπεια αυτού είναι ότι στην περίπτωση του ομαλού ανέμου δεν ερμηνεύονται οι μεταβολές που εμφανίζονται, σε διακριτές περιοχές των BAL κοιλάδων, μεταξύ διαφορετικών εποχών.

Ο Elvis (2000) κατασκεύασε ένα μοντέλο ανέμου σύμφωνα με το οποίο η εκροή πηγάζει κάθετα στον δίσκο προσαύξησης, από μια στενή περιοχή ακτινών, είναι χωνοειδούς σχήματος και η ταχύτητά του είναι αντίστοιχη με την ταχύτητα των BEL νεφών. Η πίεση της ακτινοβολίας επιταχύνει την εκροή ακτινικά, με αποτέλεσμα αυτή να κάμπτεται προς τα έξω σχηματίζοντας έναν κώνο γωνίας ~60° ενώ η γωνία απόκλισης του είναι ~6° με αποτέλεσμα να προκύπτει παράγοντας κάλυψης ~10%. Το μοντέλο, προβλέπει τόσο τις ομαλές BALs και NALs (Narrow Absorption Lines¹⁶) που

¹⁵ Ως παράμετρος ιονισμού ορίζεται ο λόγος της ιονίζουσας ροής των φωτονίων προς την πυκνότητα του αερίου: $U = \int_{v_0}^{\infty} L_v dv / hv / 4\pi r^2 c N_e$, όπου L_v είναι η μονοχρωματική λαμπρότητα της πηγής της ακτινοβολίας ανά μονάδα συχνότητας, r είναι η απόσταση του νέφους, N_e είναι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων, v_0 η συχνότητα κατωφλίου για ιονισμό. Στην περίπτωση του ιονισμένου υδρογόνου η παράμετρος ιονισμού εκφράζει το λόγο της πυκνότητας των φωτονίων ιονισμού προς την πυκνότητα του ουδέτερου υδρογόνου.

¹⁶ Οι εκροές των quasars εκτός από πλατιές γραμμές απορρόφησης (BALs) παράγουν και στενές γραμμές απορρόφησης (Narrow Absorption Lines) με εύρη μερικές εκατοντάδες km/s (εύρη μεγαλύτερα από τα θερμικά εύρη για $T \sim 10^4 - 10^5 K$). Σαφής ορισμός των NALs δεν υπάρχει αλλά η επιστημονική κοινότητα δέχεται ως NALs εκείνες τις γραμμές απορρόφησης των οποίων το FWHM είναι μικρότερο από τη διαφορά μεταξύ των συνιστωσών μιας διπλέτας συντονισμού (π.χ. ~500 km/s για τον C IV, ~960 km/s για το N V ή ~1930 km/s για το Si IV), (Hamann & Ferland 1999). Εκτός από τις NALs, τα φάσματα των quasar εμφανίζουν και ένα τρίτο είδος γραμμών, τις mini-BALsμε εύρη μικρότερα από 2000 km/s, το οποίο είναι το κάτω όριο των BALs, και μεγαλύτερα από το εύρος των NALs. Τόσο οι NALs όσο και οι mini-BALs εμφανίζουν ιδιότητες παρόμοιες με αυτές των BALs, δηλαδή παρόμοια επίπεδα ιονισμού, μεγάλες ταχύτητες απομάκρυνσης από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής, μεταβλητότητα, ανώμαλους λόγους οπτικών βαθών μεταξύ των μελών μιας διπλέτας συντονισμού. Και τα τρία είδη γραμμών θεωρείται ότι προέρχονται από την ίδια περιοχή. Σύμφωνα με την πιο διαδεδομένη άποψη, οι BALs σχηματίζονται στο κυρίως σώμα της εκροής κοντά στο επίπεδο του δίσκου προσαύξησης ενώ οι NALs και mini-BALs σχηματίζονται σε μεγαλύτερα υψόμετρα και κοντά στα χείλη της εκροής (Ganguly et al. 2001, Hamann et al. 2008, Chartas et al. 2009, Hamann et al. 2012).

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι οι προαναφερθείσες NALs είναι οι ενδογενείς στενές γραμμές απορρόφηση των quasars. Στα φάσματα των quasars εμφανίζονται και στενές γραμμές εκπομπής που δεν ανήκουν στον quasar. Αυτές είναι οι παρεμβαλλόμενες (intervening) οι οποίες οφείλονται σε

εμφανίζονται στο υπεριώδες καθώς επίσης και τις BELs του υπεριώδους. Παρόλα αυτά, το μοντέλο του Elvis (2000), όπως και όλα τα μοντέλα ομαλών ανέμων, αποτυγχάνει να ερμηνεύσει τις πολύπλοκες κοιλάδες απορρόφησης οι οποίες φέρουν διακριτές συνιστώσες απορρόφησης, διακριτές κοιλάδες απορρόφησης ή κοιλάδες απορρόφησης αποκομμένες από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής κατά χιλιάδες km/s.



Εικόνα 2.1. Στην επάνω εικόνα παρουσιάζεται το φάσμα του Q1303+308, από το οποίο δεν έχει αφαιρεθεί η ερυθρομετάθεση. Ο Q1303+308 αποτελεί τυπικό παράδειγμα quasar του οποίου οι κοιλάδες απορρόφησης φέρουν πλειάδα διακριτών φασματικών χαρακτηριστικών τα οποία δεν μπορούν να ερμηνευθούν μέσω του μοντέλου ομαλού και ομοιογενούς ανέμου (Weyman, Foltz 1983). Κάτω, παρουσιάζεται το φάσμα του SDSS J091307.83+442014.3, στα εργαστηριακά μήκη κύματος. Ο εν λόγω BALQSO αποτελεί τυπικό παράδειγμα, μη ομαλών και πολύπλοκων P-Cygni προφίλ, τα οποία χαρακτηρίζονται από διακριτές κοιλάδες απορρόφησης σε συνδυασμό με στενές γραμμές απορρόφησης. Ο SDSS J091307.83+442014.3 αποτελεί αντικείμενο μελέτης της εν λόγω εργασίας και παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6.

παρεμβαλλόμενα νέφη, στην γραμμή παρατήρησης, τα οποία δεν σχετίζονται με τον quasar ή σχετίζονται με νέφη του γαλαξία που φιλοξενεί τον quasar. Ο διαχωρισμός των ενδογενών από τις παρεμβαλλόμενες NALs γίνεται βάση των επόμενων χαρακτηριστικών τα οποία εμφανίζουν μόνο οι ενδογενείς: α) μεγάλες ακτινικές ταχύτητες, β) φαινόμενο της μερικής κάλυψης, γ) ανώμαλους λόγους οπτικών βαθών μεταξύ των μελών μιας διπλέτας συντονισμού, δ) έντονη και ταχεία μεταβλητότητα, ε) εύρη γραμμών τα οποία είναι μεγαλύτερα από το αναμενόμενο θερμικό εύρος της εκάστοτε γραμμής (Bahcall et al. 1967, Barlow & Sargent, 1997, Hamann & Ferland 1999).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα BALQSOs, τα οποία δεν μπορούν να ερμηνευθούν μέσω ενός μοντέλου ομαλού ανέμου είναι ο QSO 1303+308 και ο SDSS J091307.83+442014.3 που παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.1.

Όπως και στους θερμούς αστέρες οι οποίοι εμφανίζουν μη ομαλούς ανέμους, έτσι και στην περίπτωση των quasars, οι άνεμοί τους απέχουν πολύ από το να είναι ομαλοί. Αν αναλογιστούμε ότι οι άνεμοι των quasars προέρχονται από τον περιστρεφόμενο δίσκο προσαύξησης που περιβάλει την υπερμεγέθη μελανή οπή, στο περιβάλλον της οποίας εκδηλώνονται εκρηκτικά και βίαια επεισόδια, είναι αναμενόμενη η ανάπτυξη ασταθειών εντός της ταχύτατης εκροής (~30000 km/s) οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν στον σχηματισμό πυκνωμάτων εντός αυτής. Έτσι, τα μοντέλα ομαλών ανέμων μπορεί μεν να εξυπηρετούν και να διευκολύνουν τη μελέτη των εκροών των quasars αλλά δεν εκφράζουν την πραγματικότητα, κάτι το οποίο είναι εμφανές μέσω της αδυναμίας τους να προσομοιώνουν όλο το φάσμα των προφίλ των BALs.

2.2.2.2. Μοντέλα πυκνωμάτων

Η εναλλακτική πρόταση για τους ανέμους των quasars είναι τα μοντέλα ανέμων που περιέχουν πυκνώματα-νέφη (clumpy wind models). Κατά αναλογία με τα μοντέλα ομαλών ανέμων των θερμών αστέρων τα οποία δεν μπορούσαν να ερμηνεύσουν μια σειρά παρατηρησιακών δεδομένων, αναπτύχθηκαν τα μοντέλα πυκνωμάτων και στην περίπτωση των quasars. Τα βασικά παρατηρησιακά και θεωρητικά δεδομένα τα οποία συνηγορούν στο ότι οι άνεμοι των quasars δεν είναι ομαλοί, συνεχείς και ομοιογενείς είναι:

Παρατηρησιακά δεδομένα

- Η ποικιλομορφία και η πολυπλοκότητα των BAL προφίλ (βλέπε § 1.2.1), και το γεγονός ότι δεν έχει καταστεί δυνατή η προσομοίωση τους από ένα θεωρητικό μοντέλο ομαλού ανέμου. Η υπόθεση ότι η εκροή αποτελείται από πυκνώματα-νέφη εξαιτίας των παρατηρήσεων όλο και περισσότερων BALQSOs με πολύπλοκα προφίλ έχει προταθεί από πολλές μελέτες. Ενδεικτικά αναφέρονται οι κάτωθι:
 - Οι Mushotzky et al. (1972), προκειμένου να ερμηνεύσουν, τα πολύπλοκα BAL προφίλ, πρότειναν ότι αυτά δημιουργούνται από νέφη τα οποία επιταχύνονται από την ακτινοβολιακή πίεση. Το σημείο εκκίνησής των Mushotzky et al. (1972) είναι η πίεση της ακτινοβολίας λόγω σκέδασης στις γραμμές συντονισμού που λαμβάνει χώρα στα εξωτερικά κελύφη των Ο και Β αστέρων όπως έδειξαν οι Lucy & Solomon (1970).
 - Οι Weymann et al. (1979) και Turnshek et al. (1980) για να ερμηνεύσουν το γεγονός ότι οι BAL κοιλάδες εμφανίζουν μεγάλη ποικιλομορφία (BAL προφίλ τα οποία είναι ιδιαίτερα ομαλά χωρίς ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, και BAL προφίλ που εμφανίζουν στο εσωτερικό τους δομές από μικρό έως πολύ μεγάλο βαθμό) πρότειναν την εξέλιξη μιας αρχικά ομαλής ροής η οποία «σπάει» εξαιτίας των ασταθειών σε πολύ μικρότερα νέφη (cloudlets). Πιο συγκεκριμένα, πρότειναν ότι τα προφίλ τύπου P-Cygni προέρχονται από μια νεαρή περιοχή απορρόφησης η οποία καθώς εξελίσσεται τα νέφη απορρόφησης γίνονται γηραιότερα και πιο διασκορπισμένα. Εναλλακτικά,

πρότειναν ότι διάφορες αστάθειες προκαλούν τη διάλυση ενός ομαλού ανέμου σε πλειάδα νεφών. Πιο συγκεκριμένα, οι Weymann et al. (1979) αναφερόμενοι στους BALQSOs που φέρουν πολλαπλές και διακριτές κοιλάδες απορρόφησης προτείνουν ότι αυτές δεν αντιπροσωπεύουν μια συνεχή εκροή αλλά προέρχονται από διαφορετικά εκρηκτικά φαινόμενα. Αν η ερμηνεία τους αυτή είναι ορθή τότε θα περιμέναμε να παρατηρούμε ότι η πυκνότητα στήλης των εκτοξευόμενων νεφών να μειώνεται καθώς τα νέφη διασκορπίζονται προς τα έξω και να δημιουργούνται όλο και πιο περίπλοκες δομές απορρόφησης όσο η αδιαφάνεια της γραμμής μειώνεται. Το τελικό αποτέλεσμα θα είναι να επιζούν μόνο τα έντονα και απομονωμένα φασματικά χαρακτηριστικά απορρόφησης.

- Οι Weymann et al. (1985) υιοθετώντας το μοντέλο νεφών (cloudy filament • model-νέφη τα οποία συγκεντρώνονται σε νηματοειδείς σχηματισμούς) ότι στους περισσότερους BALQSOs τα σημειώνουν προφίλ τους δημιουργούνται από μερικά μεγάλα νέφη, με μέτρια οπτικά βάθη του CIV, και πολλά μικρά νέφη με οπτικά βάθη της μονάδας ή μικρότερα. Αυτά τα μικρά νέφη μπορεί να μην είναι ορατά στο Si IV γεγονός που δίνει την εντύπωση περί μιας πιο απομονωμένης δομής. Σύμφωνα με τους Weymann et al. (1985) μία και μόνο κοιλάδα απορρόφησης μπορεί να οφείλεται σε ένα μεγάλο νέφος το οποίο περνά από την γραμμή παρατήρησης. Το κεντρικό αυτό νέφος ακολουθείται από μικρότερα νέφη (cloudlets) τα οποία έχουν αποκολληθεί από το κύριο νέφος και επιταχύνονται σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Έτσι, όταν παρατηρούνται BALQSOs με πολλαπλές κοιλάδες απορρόφησης, η γραμμή παρατήρησης περνά πιθανότατα μέσα από πολλές BALR.
- 2. Παρατηρήσεις BALQSOs μέσω βαρυτικών φακών καταδεικνύουν ότι οι εκροές αποτελούνται από πυκνώματα. Πιο συγκεκριμένα, οι Misawa et al. (2014, 2016) κατάφεραν να παρατηρήσουν μεμονωμένους quasar μέσω διαφορετικών γραμμών παρατήρησης, κάνοντας χρήση του φαινομένου των βαρυτικών φακών. Μέσω των παρατηρήσεών τους, κατάφεραν να διακρίνουν τις δομές στο εσωτερικό των ανέμων και ως αποτέλεσμα απέρριψαν την υπόθεση περί ομαλής εκροής καταλήγοντας ότι στους εν λόγω quasars οι εκροές στο εσωτερικό τους φέρουν πολύπλοκες μικρές δομές.
- 3. Η έντονη μεταβλητότητα των BALs αλλά και η συμπεριφορά της μεταβλητότητας σε μεγάλες χρονικές κλίμακες. Σύμφωνα με μελέτες μεταβλητότητας, μεγάλης χρονικής κλίμακας, οι αλλαγές που εμφανίζουν οι πλατιές κοιλάδες απορρόφησης, οφείλονται σε νέφη που εδράζονται εντός της γραμμής παρατήρησης (βλέπε § 2.4.2).
- 4. Το φαινόμενο του κλειδώματος των φασματικών γραμμών (Line Locking: Milne 1926) είναι μια σημαντική ένδειξη της ύπαρξης νεφών τα οποία επιταχύνονται από την πίεση της ακτινοβολίας.

Η βασική αρχή πίσω από το φαινόμενο του "Line Locking" (Milne 1926, Scargle 1973, Foltz et al. 1987, Braun & Milgrom 1989) στους ακτινοβολιακά επιταχυνόμενους ανέμους είναι ότι ένα νέφος/πύκνωμα πιο κοντά στη μελανή οπή μπορεί να θωρακίσει ένα πύκνωμα που βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση με αποτέλεσμα τον συγχρονισμό των ταχυτήτων τους. Στην περίπτωση των γραμμών συντονισμού όπως είναι οι C IV, Si IV, N V έχουμε το εξής αποτέλεσμα. Έστω δύο νέφη απορρόφησης του C IV (λλ 1548.187, 1550.772 Å, blue: 1548.187 Å, red: 1550.772 Å), τα οποία επιταχύνονται ακτινοβολιακά προς τα έξω και η διαφορά στις ταχύτητές των νεφών ($\Delta v_{clouds} \approx 500 \text{ km/s}$) ισούται με τη διαφορά ταχυτήτων μεταξύ των δύο γραμμών συντονισμού ($v_{red} - v_{blue} = \Delta v \approx 500 \text{ km/s}$). Το αποτέλεσμα θα είναι η κόκκινη συνιστώσα του εξωτερικού νέφους να βρίσκεται στην ίδια ταχύτητα με την μπλε συνιστώσα του εσωτερικού νέφους. Έτσι αυτά τα δύο νέφη είναι κλειδωμένα στο χώρο των ταχυτήτων. Η εμφάνιση του φαινομένου αυτού στα φάσματα των quasars καταδεικνύει την ύπαρξη νεφών εντός της εκροής (Hamann et al. 2011).

- 5. Τα κορεσμένα προφίλ των BALs τα οποία όμως δεν αγγίζουν την μηδενική ένταση και ο λόγος οπτικών βαθών μεταξύ των γραμμών συντονισμού ο οποίος δεν συμφωνεί με τη θεωρία, καταδεικνύουν την μερική κάλυψη της πηγής του συνεχούς από νέφη απορρόφησης (βλέπε § 2.3).
- 6. Οι Hamann et al. (2011), μελετώντας τον quasar SDSS J212329.46-005052.9, εντόπισαν πέντε στενές γραμμές απορρόφησης (Narrow Absorption Lines-NALs), μεγάλης ταχύτητας. Προκειμένου να παραχθούν αυτές οι γραμμές απαιτούνται τουλάχιστον πέντε διακριτές δομές, εντός της εκροής, με παρόμοιες φυσικές συνθήκες, μεγέθη και κινηματική συμπεριφορά.
- 7. Οι Lyratzi et al. (2008, 2009, 2010a, b, c, 2011), Danezis et al. (2007, 2008, 2010), πρότειναν ότι όπως και στην περίπτωση των θερμών αστέρων, οι άνεμοι των BALQSOs στο εσωτερικό του αναπτύσσουν πυκνώματα. Εφάρμοσαν το μοντέλο πυκνωμάτων, που είχαν κατασκευάσει προκειμένου να προσομοιώσουν τις BALs Si IV, C IV, N V, Lyα σε μεμονωμένους QSOs και υπολόγισαν τις ταχύτητες απομάκρυνσης των νεφών, τα οπτικά τους βάθη όπως και εύρη των συνιστωσών που προκαλούνται από τα εν λόγω νέφη.
- 8. Οι Stathopoulos et al. (2015, 2017, 2019), κάνοντας χρήση του μοντέλου GR (Danezis et al. 2003, 2007), Lyratzi et al. (2007) και του λογισμικού ASTA (Tzimeas et al. 2019), έδειξαν ότι: α) τα προφίλ των BALs Si IV και C IV, ανεξάρτητα από τη μορφή τους (ομαλά ή μη ομαλά τα οποία φέρουν πολλαπλές κοιλάδες ή διακριτές συνιστώσες), μπορούν να προσομοιωθούν με μεγάλη ακρίβεια μέσω σύνθεσης επιμέρους συνιστωσών, β) ότι οι BALs Si IV και C IV αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών, που σημαίνει ότι τα νέφη απορρόφησης περιέχουν και τα δύο ιόντα, γ) μέσω μιας σειράς προτεινόμενων κριτηρίων προσομοίωσης (Stathopoulos et al. 2015, 2019), μπορεί να καθοριστεί με μοναδικό τρόπο ο αριθμός των συνιστωσών από τις οποίες αποτελούνται οι BALs Si IV και C IV και με τον τρόπο αυτό μπορούν να μελετηθούν ανεξάρτητα οι μεμονωμένες δομές (νέφη) στη γραμμή παρατήρησης, δ) τα νέφη απορρόφησης αποτελούν σμήνη/σύνολα από μικρότερες δομές -μικρά νέφη (cloudlets).
- 9. Οι Stathopoulos et al (2017) αναλύοντας τις BALs Si IV και C IV, στον αριθμό των συνιστωσών από τις οποίες αποτελούνται, στην περίπτωση δύο BALQSOs, έδειξαν ότι μεταβλητότητα των BALs οφείλεται σε κινήσεις μεμονωμένων νεφών στη γραμμή παρατήρησης.
- 10. Οι Lu & Lin (2018) μελέτησαν τις BALs Si IV και C IV, στα φάσμα του J002710.06-094435.3 και έδειξαν ότι και οι δύο BALs είναι το αποτέλεσμα σύνθεσης επιμέρους συνιστωσών και μάλιστα ότι αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών επιβεβαιώνοντας τη δουλειά των Stathopoulos et al. (2015, 2017). Σημειώνεται ότι

οι Lu & Lin (2018) κατάφεραν μεν να προσομοιώσουν την BAL Si IV μέσω πολλαπλών συνιστωσών χωρίς όμως να καταφέρουν να προσομοιώσουν την αντίστοιχη BAL του C IV, στην οποία απλά εντόπισαν τον ίδιο αριθμό συνιστωσών.

11. Οι Stathopoulos et al. (2019) μελετώντας την μεταβλητότητα των BAL Si IV και C IV σε 10 BALQSOs βρήκαν ότι οι εν λόγω BALs οφείλονται σε νέφη τα οποία εμφανίζουν παρόμοιες αποστάσεις από την μελανή οπή, παρόμοια κινηματική συμπεριφορά και φυσικές συνθήκες. Επίσης βρήκαν ότι οι συνιστώσες απορρόφησης των BALs Si IV και C IV εμφανίζουν ανεξάρτητες μεταβολές γεγονός που καταδεικνύει την διακριτότητα και ανεξαρτησία των νεφών που με τη σειρά του σημαίνει πως οι BAL εκροές απέχουν πολύ από τα να είναι ομαλές και ομοιογενείς.

<u>Θεωρητικά δεδομένα</u>

- 1. Τα clumpy wind μοντέλα προσφέρουν μια πιθανή λύση στο πρόβλημα του υπεριονισμού¹⁷ των εκροών των quasar και των AGN (Hamann et al. 2013).
- 2. Οι Takeuchi et al. (2013) πραγματοποίησαν, ακτινοβολιακές μαγνητοϋδροδυναμικές προσομοιώσεις, τριών διαστάσεων, για προσαύξηση σε μελανή οπή μάζας 10^8 M_{\odot} . Μέσω των προσομοιώσεών τους επιβεβαιώνουν τη παραγωγή μη ευθυγραμμισμένων εκροών με ταχύτητες 0.1c, οι οποίες δεν είναι ομαλές αλλά εμφανίζουν στο εσωτερικό του δομές, πυκνώματα, για ύψη πάνω από ~250 r_s (όπου r_s η ακτίνα Schwarzschild) (βλέπε Εικόνα 2.2a). Το τυπικό μέγεθος ενός πυκνώματος είναι ~10 r_s, που αντιστοιχεί σε οπτικό βάθος ίσο με μονάδα (δηλαδή μία ελεύθερη διαδρομή). Οι Takeuchi et al. (2013) αποδίδουν τη δημιουργία των νεφών στην αστάθεια Rayleigh-Taylor εντός του ανέμου.
- 3. Οι Takeuchi et al. (2014), διερεύνησαν την επίδραση της ακτινοβολιακήςυδροδυναμικής αστάθειας (Radiation Hydrodynamic-RHD) σε super-Eddington ατμόσφαιρες παράλληλης στρωμάτωσης (plane parallel), κάνοντας χρήση RHD προσομοιώσεων (βλέπε Εικόνα 2.2b). Τα αποτελέσματά τους κατέδειξαν τον σχηματισμό πυκνωμάτων εντός της super-Eddington εκροής το μέγεθος των

¹⁷Από του ενδότερο μέρος του δίσκου προσαύξησης παράγονται ακτίνες Χ. Το εξαιρετικά έντονο πεδίο ακτινοβολίας, που εν δυνάμει μπορεί να προκαλέσει τις εκροές, μπορεί να υπεριονίσει το αέριο κάνοντάς το υπερβολικά διάφανο ώστε να μπορεί να επιταχυνθεί ακτινοβολιακά. Επιπροσθέτως, στα φάσματα των quasars, παρατηρούνται γραμμές C IV και O VI, προερχόμενες από την BAL εκροή, γεγονός που σημαίνει ότι ο ιονισμός του αερίου διατηρείται σε αρκούντως χαμηλά επίπεδα που επιτρέπει τη δημιουργία αυτών των γραμμών. Οι Murray et al. (1995) και Murray & Chiang (1997) για να λύσουν αυτό το πρόβλημα, πρότειναν ότι στη βάση της BAL εκροής αναπτύσσεται μια υψηλά ιονισμένη και ακτινοβολιακά πυκνή περιοχή απορρόφησης. Η περιοχή αυτή είναι τόσο πολύ ιονισμένη και τόσο διάφανη που δεν μπορεί να επιταχυνθεί ακτινοβολιακά αλλά θωρακίζει το BAL αέριο από την ιονίζουσα ακτινοβολιακά. Το εν λόγω αέριο θωράκισης στη βάση της BAL εκροής, έχει γίνει ένα απαραίτητο συστατικό των θεωρητικών μοντέλων ανέμων (Proga et al. 2000, Chelouche & Netzer 2003, Proga & Kallman 2004, Proga 2007, Sim et al. 2010).

Παρόλα αυτά, το πρόβλημα με το αέριο θωράκισης της BAL εκροής προκύπτει αν ληφθεί υπόψη ότι οι NALs και mini-BALs χαρακτηρίζονται από ίδιες ταχύτητες απομάκρυνσης και ίδια επίπεδα ιονισμού με τις BALs χωρίς την προστασία ενός μέσου το οποίο θωρακίζει το αέριο από τον υπεριονισμό (Hamann et al. 2013). Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι το αέριο θωράκισης δεν αποτελεί ένα αδιαμφισβήτητα απαραίτητο χαρακτηριστικό των εκροών. Οι Hamann et al. (2013), έδειξαν ότι αν ο άνεμος δεν είναι ομαλός αλλά στο εσωτερικό του αναπτύσσονται πυκνώματα μεγάλης πυκνότητας, τότε είναι δυνατόν ο ιονισμός να διατηρείται στα επιθυμητά επίπεδα για τη δημιουργία γραμμών C IV, O VI και να επιτυγχάνεται η ακτινοβολιακή πρόκληση και επιτάχυνση του ανέμου χωρίς να χρειάζεται η ύπαρξη ενός αερίου θωράκισης στη βάση της εκροής.

οποίων αντιστοιχεί σε οπτικό βάθος ίσο με μονάδα (δηλαδή μία ελεύθερη διαδρομή).

- 4. Οι Mościbrodzka & Proga (2013) μελέτησαν την ευστάθεια νεφών στο πλαίσιο των ενεργών γαλαξιακών πυρήνων. Μέσω 1-D και 2-D προσομοιώσεων έδειξαν ότι ψυχρές συμπυκνώσεις εντός της εκροής αρχικά σχηματίζουν μακριούς νηματοειδείς σχηματισμούς οι οποίοι σε μετέπειτα χρόνο σπάνε σε μικρότερα νέφη τα οποία μεταφέρονται προς τα έξω εντός της θερμής εκροής (βλέπε Εικόνα 2.2c).
- 5. Οι Proga et al. (2014) μελέτησαν μέσω αριθμητικών, χρονοεξαρτημένων, ακτινοβολιακών υδροδυναμικών προσομοιώσεων την έντονη ακτινοβόληση ενός νέφους. Βρήκαν ότι ακόμη και στην περίπτωση σχετικά πυκνών νεφών, τα οποία θερμαίνονται ακτινοβολιακά, αυτά δεν κινούνται ως ένα σύνολο αλλά αντιθέτως υπόκεινται σε ταχεία και μεγάλη εξέλιξη ως προς το σχήμα, το μέγεθος και τις φυσικές συνθήκες.
- 6. Οι Proga & Waters (2015) πραγματοποιώντας υδροδυναμικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι η θερμική αστάθεια μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία νεφών, εντός της εκροής, τα οποία η ακτινοβολιακή πίεση επιταχύνει σε υπερηχητικές ταχύτητες. Επίσης βρήκαν ότι τα νέφη καταστρέφονται εξαιτίας των ασταθειών Rayleigh-Taylor και Kelvin-Helmholtz, αφού πρώτα επιταχυνθούν σημαντικά (βλέπε Εικόνα 2.2 d).
- 7. Οι Waters & Proga (2016) μελέτησαν την επίδραση μιας χρονικά μεταβαλλόμενης ακτινοβολιακής ροής στην δημιουργία και επιτάχυνση νεφών, μέσω υδροδυναμικών προσομοιώσεων. Βρήκαν ότι η εξέλιξη ενός μέσου δύο φάσεων (υποθετικό μέσον περιορισμού των νεφών που προτάθηκε από τον Mathews 1974 και μελετήθηκε εκτενώς από τους Krolik et al. 1981). Το αέριο που εκτίθεται στην ακτινοβολία του quasar εμφανίζει δύο μορφές, φωτοϊονισμένο αέριο σε T~10⁴ K, το οποίο παράγει τις φασματικές γραμμές στο οπτικό και υπεριωδες, ή θερμό αέριο στους T~10⁸ K. Η φάση του θερμού αερίου παρέχει τον περιορισμό των νεφών τα οποία βρίσκονται εντός μιας ροής με έντονη τυρβώδη ροή η οποία οδηγεί στην συνεχή παραγωγή νεφών. Τέλος, βρήκαν ότι η παραγωγή νεφών μπορεί να διατηρηθεί επειδή η τυρβώδης ροή παρέχει διαταραχές οι οποίες διαρκώς πυροδοτούν την θερμική αστάθεια.
- 8. Οι Kobayashi et al. (2018) πραγματοποίησαν ακτινοβολιακές-υδροδυναμικές (RHD) προσομοιώσεις για υπερκρίσιμη ροή προσαύξησης σε μελανή οπή μάζας 10M_O. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καταδεικνύουν την ανάδυση μιας ασταθούς εκροής στο εσωτερικό της οποίας αναπτύσσονται πυκνώματα (clumpy outflow). Τα πυκνώματα περιστρέφονται γύρω από την κεντρική μελανή οπή σε αποστάσεις ~10³ r_s με υπό-Κεπλεριανές ταχύτητες. Το τυπικό μέγεθος του πυκνώματος είναι της τάξης των ~30r_s κατά την ακτινική διεύθυνση ενώ το μέγεθος κατά την γωνιακή διεύθυνση είναι της τάξης των 10²r_s (βλέπε Εικόνα 2.2e, f).
- 9. Οι Dexter & Agol (2011) πρότειναν ότι ακόμη και ο δίσκος είναι μη ομοιογενής και ότι αποτελείται από πυκνώματα με ανεξάρτητα μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες.



Εικόνα 2.2. (a) Η δύο διαστάσεων δομή της εκροής γύρω από μελανή οπή μάζας $10^8 M_{\odot}$. Οι πράσινη γραμμή ορίζει την επιφάνεια στην οποία η πίεση της ακτινοβολίας εξισορροπεί τη δύναμη της βαρύτητας (Takeuchi et al. 2013). (b) Χρονική εξέλιξη της RHD αστάθειας για μια, super – Eddington, ατμόσφαιρα παράλληλης στρωμάτωσης. Οι σχηματισμοί αντιπροσωπεύουν την πυκνότητα της ύλης εντός της ατμόσφαιρας (Takeuchi et al. 2014). (c) Κατανομή πυκνότητας στο εσωτερικό της εκροής γύρω από μελανή οπή μάζας $10^8 M_{\odot}$ (Mościbrodzka & Proga 2013). (d) Στιγμιότυπα της δημιουργίας και εξέλιξης ενός νέφους συναρτήσει του χρόνου (Proga & Waters 2015). (e) Κατανομή πυκνότητας στο εσωτερικό της εκροής πυκνότητας στο εσωτερικό της εκροής ποι δομές πλάσματος εντός της εκροής (Kobayashi et al. 2018). (f) Αξονομετρική προβολή της 3-D δομής της πυκνότητας του πλάσματος εντός της εκροής γίρα σπό μελανή οπή μάζας 10M_☉. Στις εικόνες z και r είναι το ύψος και η ακτίνα σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων.

10. Οι Matthews et al. (2016) πραγματοποίησαν προσομοιώσεις διάδοσης ακτινοβολίας κάνοντας χρήση της μεθόδου Monte Carlo προκειμένου να δημιουργήσουν θεωρητικά BAL προφίλ τα οποία παράγονται από έναν δικωνικό δισκοειδή άνεμο. Στον κώδικά τους έχουν εισάγει έναν παράγοντα που επιτρέπει τη δημιουργία πυκνωμάτων εντός της εκροής. Τα αποτελέσματά τους είναι αρκετά ικανοποιητικά καθώς τα θεωρητικά προφίλ μοιάζουν με παρατηρούμενα προφίλ αν και απέχουν πολύ από την πραγματικότητα. Σημειώνεται ότι και στο εν λόγω μοντέλο τα παραγόμενα BAL προφίλ μπορούν να προσεγγίσουν μόνο τις ομαλές τύπου P-Cygni κοιλάδες απορρόφησης (βλέπε Εικόνα 2.3) αλλά δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν πιο περίπλοκες BALs οι οποίες εμφανίζουν περίπλοκη δομή με πολλαπλά διακριτά φασματικά χαρακτηριστικά ή πολλαπλές κοιλάδες απορρόφησης.



Εικόνα 2.3. Συνθετικά φάσματα για διαφορετικές γωνίες (730, 760) παρατήρησης τα οποία συγκρίνονται με τα φάσματα των BALQSOs PG0946+301 και SDSS J162901.63+453406.0. Με μπλε και πράσινο χρώμα δίνεται το παρατηρούμενο φάσμα ενώ με μαύρο χρώμα η μοντελοποίηση (Matthews et al. 2016).

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα ανωτέρω, είναι ότι το μοντέλο ανέμων στο εσωτερικό των οποίων αναπτύσσονται πυκνώματα, αποτελεί ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο για την περιγραφή των BAL εκροών.

2.3. Μερική κάλυψη των πηγών εκπομπής ακτινοβολίας

Όπως προαναφέρθηκε, οι BALs εμφανίζουν κορεσμένα προφίλ (επίπεδο πυθμένα) ο οποίος όμως δεν αγγίζει την μηδενική ροή (non-black saturation¹⁸) με αποτέλεσμα να

¹⁸ Black Saturation: Το βάθος μιας γραμμής απορρόφησης, σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος εξαρτάται από το οπτικό βάθος το οποίο αποτελεί ένα μέτρο των μέσων ελεύθερων διαδρομών που διασχίζει ένα υποθετικό φωτόνιο το οποίο κινείται δια μέσω μιας στήλης απορρόφησης προς τον παρατηρητή. Αν η πυκνότητα στήλης και κατ' επέκταση το οπτικό βάθος είναι αρκούντως μεγάλα, το απορροφών αέριο μπορεί να γίνει αδιαφανές για μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες ατομικές μεταβάσεις, με αποτέλεσμα τον κορεσμό της γραμμής απορρόφησης. Στην περίπτωση που το αέριο καλύπτει πλήρως την πηγή της ακτινοβολίας, η γραμμή απορρόφησης θα αγγίζει την

παρατηρείται υπολειπόμενη ένταση (residual intensity, Εικόνα 2.4). Συγχρόνως οι γραμμές συντονισμού ιόντων όπως τα Si IV, C IV, N V κ.α. εμφανίζουν λόγο οπτικών βαθών μεταξύ μπλε και κόκκινης συνιστώσας ο οποίος αποκλίνει από την θεωρητικά αναμενομένη τιμή. Από την ατομική φυσική είναι γνωστό ότι ο λόγος των οπτικών βαθών μεταξύ των γραμμών συντονισμού έχει συγκεκριμένη τιμή και ισούται με το λόγο των oscillator strengths (Savage & Sembach 1991, Verner et al. 1994). Στην περίπτωση του C IV λλ 1548, 1551 Å είναι: $τ_{1548}/τ_{1551} \approx 2/1$ και του Si IV είναι $τ_{1393}/τ_{1402} \approx 2/1$. Στην περίπτωση των BALQSOs ο λόγος οπτικών βαθών για τις γραμμές απορρόφησης των Si IV και C IV έχει βρεθεί να κυμαίνεται μεταξύ $1 \le τ_b/τ_r \le 2$.

Υπάρχουν τρεις μηχανισμοί οι οποίοι μπορούν να «γεμίσουν» τα κορεσμένα προφίλ των BALs (ώστε να μην αγγίζουν την μηδενική ένταση) και γενικά να προκαλέσουν ανώμαλους λόγους οπτικών βαθών μεταξύ των συνιστωσών μιας διπλέτας συντονισμού:

- Φωτόνια του συνεχούς ή/και της BEL περιοχής τα οποία δεν απορροφώνται και/ή σκεδάζονται στην γραμμή παρατήρησης των απορροφητών (Ganguly et al. 1999).
- Μια συνάρτηση πηγής, δηλαδή τοπική εκπομπή του απορροφητή (Wampler et al. 1995).
- Μερική κάλυψης της πηγής του συνεχούς ή/και της BEL περιοχής (Wampler et al. 1995, Barlow & Sargent 1997, Hamann et al. 1997a,b, Ganguly et al. 1999). Εξαιτίας της μερικής κάλυψης η ακτινοβολία η οποία δεν υπόκειται σε απορρόφηση προκαλεί μεταβολές στα σχετικά βάθη των γραμμών συντονισμού.



Εικόνα 2.4. Σχηματική αναπαράσταση μιας κορεσμένης φασματικής γραμμής και της υπολειπόμενης έντασης (residual intensity). Η φασματικής γραμμή παρουσιάζει το φαινόμενο του non-black saturation.

Η επικρατούσα ερμηνεία για την παρατηρούμενη ασυνέπεια στους λόγους των οπτικών βαθών είναι ότι ο απορροφητής καλύπτει μερικώς την πηγή του συνεχούς ή/και την BEL περιοχή. Το φαινόμενο της μερικής κάλυψης θα έχει ως αποτέλεσμα, τα

μηδενική ένταση τουλάχιστον για το εύρος μηκών κύματος που καλύπτει η γραμμή. Μία τέτοια γραμμή ανήκει στο μη γραμμικό μέρος της καμπύλης ανάπτυξης που περιγράφει την εξάρτηση του οπτικού βάθους από την πυκνότητα στήλης του ιόντος (Carroll & Ostlie, 2006).

μοντέλα που θεωρούν πλήρη κάλυψης της εκπομπής (συνεχούς ή/και BEL) να υπερεκτιμούν την ένταση της μπλε συνιστώσας μιας διπλέτας σε σχέση με την ένταση της κόκκινης. Από φυσικής άποψης η ένταση της ακτινοβολίας που παρατηρείται στον πυρήνα ενός προφίλ απορρόφησης είναι το αποτέλεσμα της σύνθεσης δύο ακτινοβολιακών συνεισφορών: (α) ακτινοβολία η οποία δεν επικαλύπτεται από τον απορροφητή και (β) ακτινοβολία η οποία περνά μέσα από τον απορροφητή. Το κλάσμα της ακτινοβολίας που δεν περνά μέσα από τον απορροφητή είναι σχεδόν το ίδιο και για τις δύο συνιστώσες μιας διπλέτας. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα μια μεγαλύτερη αύξηση της ροής, σε σχέση με αυτό που θα περιμέναμε στην περίπτωση πλήρης κάλυψης, η οποία εντοπίζεται στο βαθύτερο τμήμα της μπλε συνιστώσας σε σχέση με την κόκκινη συνιστώσα (Ganguly et al. 1999). Όταν εμφανίζεται το φαινόμενο της μερικής κάλυψης παρατηρείται υπολειπόμενη ένταση ακτινοβολίας η οποία μπορεί να φθάσει να είναι ίδια και για τις δύο συνιστώσες απορρόφησης (Ganguly et al. 1999).

Η μερική κάλυψη μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους: (α) το νέφος απορρόφησης είναι πολύ μικρότερο από την πλήρη προβαλλόμενη έκταση της πηγής ακτινοβολίας και (β) ο απορροφητής παρόλο που μπορεί να είναι μεγαλύτερος από την πηγή ακτινοβολίας, είναι πορώδης, δηλαδή ο παράγοντας πλήρωσης (filling factor) του νέφους δεν είναι μονάδα. Το κλάσμα κάλυψης της πηγής της ακτινοβολίας υπολογίζεται μέσω της υπολειπόμενης έντασης (residual intensity) μιας γραμμής απορρόφησης και αντιπροσωπεύει το κλάσμα των φωτονίων του υποβάθρου που καλύπτεται από τον απορροφητή, σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Το οπτικό βάθος του απορροφώντος αερίου αντιπροσωπεύει εκείνα το φωτόνια που επιβιώνουν αφού η ακτινοβολία περάσει μέσα από τον απορροφητή.

Κατά κανόνα, ένας ενδογενής απορροφητής στον quasar, αναμένεται να καλύπτει μερικώς τις πηγές εκπομπής ενώ αξίζει να σημειωθεί πως το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στην περίπτωση αστέρων όπως τα T-Tauri (Ardila et al. 2013).

Ο κορεσμός των γραμμών συντονισμού και η απόκλιση του λόγου των οπτικών βαθών από τον θεωρητικά προβλεπόμενο δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στον καθορισμό της πυκνότητας στήλης του αερίου απορρόφησης. Ο παραδοσιακός τρόπος υπολογισμού των πυκνοτήτων στήλης (apparent optical depth method, $\tau_{app} = -lnI$), θεωρώντας πλήρη κάλυψη της πηγής εκπομπής οδηγεί σε υποεκτίμηση των πυκνοτήτων στήλης και των οπτικών βαθών (Barlow et al. 1997, Arav et al. 1999, 2002, Ganguly et al. 1999, Hamann & Ferland 1999, Hamann 1999a,b, Arav et al. 2008). Για τον λόγο αυτό στον ακριβή καθορισμό των πυκνοτήτων στήλης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της μερικής κάλυψης.

Όσον αφορά το θέμα της κάλυψης, υπάρχουν δύο μοντέλα: (α) το μοντέλο της ομοιογενούς μερικής κάλυψης, όπου ο απορροφητής καλύπτει μερικώς αλλά ομοιογενώς τις πηγές εκπομπής (Hamann et al. 1997b, Barlow et al. 1997) και (β) το μοντέλο ανομοιογενούς κάλυψης (de Kool et al. 2002, Arav et al. 2005).

2.4. Η μεταβλητότητα των BALs

Οι BALs εμφανίζουν μεταβλητότητα τόσο σε μικρές (ημέρες) όσο και σε μεγάλες χρονικές κλίμακες (χρόνια με δεκαετίες). Η μελέτη της μεταβλητότητας, των BALs,

μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες όσον αφορά την εξέλιξη, τη δυναμική, την κινηματική και τις βασικές φυσικές ιδιότητες της εκροής που πηγάζει από το δίσκο προσαύξησης. Η μεταβλητότητα σε μικρές χρονικές κλίμακες μπορεί να δώσει πληροφορίες σχετικά με την απόσταση του υλικού απορρόφησης από την μελανή οπή (Hamann et al. 2008, Capellupo et al. 2011). Όσο πιο γρήγορα μεταβάλλεται η απορρόφηση, τόσο πιο κοντά στη μελανή οπή βρίσκεται ο απορροφητής. Μεταβολές σε μεγαλύτερες χρονικές περιόδους μπορούν να δώσουν πληροφορίες σχετικά με την ομοιογένεια και σταθερότητα της εκροής (Capellupo et al. 2011). Αν δεν παρατηρούνται μεταβολές σε μεγάλα χρονικά διαστήματα τότε καταδεικνύεται η ύπαρξη μιας ομαλής ροής με σταθερή δομή.

Η μεταβλητότητα των BALs αποδίδεται στους εξής λόγους:

 (α) Μεταβολές στην κατάσταση ιονισμού του αερίου της εκροής, συναρτήσει της ταχύτητας, οι οποίες οφείλονται σε διακυμάνσεις της συνεχούς, ιονίζουσας ακτινοβολίας στο μακρινό υπεριώδες. Οι εν λόγω διακυμάνσεις έχουν ως αποτέλεσμα την πρόκληση μεταβολών στην πυκνότητα στήλης του απορροφώντος αερίου (Misawa et al. 2007; Gibson et al. 2010; Hamann et al. 2011; Capellupo et al. 2012; Filiz Ak et al. 2013; Wang et al. 2015; Wildy et al. 2015; He et al. 2017; Lu, Lin & Qin 2018).

(β) Μεταβολές στην κατάσταση ιονισμού του αερίου οι οποίες οφείλονται στην εξελισσόμενη πυκνότητα του αερίου εξαιτίας της θερμικής αστάθειας (Waters et al. 2017).

- Εγκάρσια κίνηση νεφών απορρόφησης ως προς τη γραμμή παρατήρησης (Gabel et al. 2003; Lundgren et al. 2007; Hall et al. 2007; Capellupo et al. 2011, 2012; Vivek et al. 2012).
- 3. Επιτάχυνση ή επιβράδυνση του υλικού απορρόφησης στην γραμμή παρατήρησης.

Εντούτοις, οι δύο κυρίαρχοι μηχανισμοί πρόκλησης της μεταβλητότητας θεωρείται ότι είναι οι (1) και (2).

Η σχέση μεταξύ της συνεχούς ακτινοβολίας και της μεταβλητότητας των BALs είναι διαφορετική σε κάθε περίπτωση. Στην περίπτωση (1α) η μεταβλητότητα του συνεχούς και των BALs σχετίζονται έντονα μεταξύ τους. Καθώς διαφορετικά μέρη της εκροής έρχονται αντιμέτωπα με το ίδιο ιονίζον συνεχές, συνιστώσες απορρόφησης, διαφορετικών ταχυτήτων, επιδεικνύουν συντονισμένη μεταβλητότητα. Για παράδειγμα, οι Filiz Ak et al. (2012, 2013) και Wildy et al. (2014) βρήκαν ότι διαφορετικές συνιστώσες εντός της ίδιας BAL, η συνιστώσες Si IV και C IV ιδίων ταχυτήτων, στον ίδιο quasar, μεταβάλλονται συντονισμένα συναρτήσει του χρόνου. Η συμπεριφορά αυτή καταδεικνύει ότι οι μεταβολές του συνεχούς προκαλούν την συντονισμένη μεταβλητότητα μεταξύ των διαφορετικών συνιστωσών απορρόφησης. Στον αντίποδα, στις περιπτώσεις (1β) και (2) η μεταβλητότητα του συνεχούς και των BALs, είναι ανεξάρτητες. Στην περίπτωση (1β) αλλαγές στα επίπεδα ιονισμού του απορροφώντος αερίου είναι δυνατόν να προκαλέσουν μη – συντονισμένη μεταβολές μεταξύ διαφορετικών συνιστωσών απορρόφησης (βλέπε Waters et al. 2017 για την περίπτωση της θερμικής αστάθειας) .της ίδιας BAL ή μεταξύ BAL συνιστωσών διαφορετικών ιόντων εντός του ιδίου quasar. Τέλος, στην περίπτωση (2) η εγκάρσια κίνηση των νεφών, στην γραμμή παρατήρησης, μπορεί να προκαλέσει μη-συντονισμένη μεταβλητότητα i) μεταξύ συνιστωσών απορρόφησης εντός της ίδιας BAL (Capellupo et al. 2012) ή μεταξύ συνιστωσών Si IV και C IV που βρίσκονται στις ίδιες ταχύτητες εντός του ιδίου quasar.

Οι μέθοδοι μελέτης της μεταβλητότητας των BALs είναι δύο:

1. Η πρώτη μέθοδος συνίσταται στη διερεύνηση της μεταβολής του συνολικού ισοδύναμου εύρους μιας κοιλάδας απορρόφησης μεταξύ δύο ή περισσότερων περιόδων (Lundgren et al. 2007, Gibson et al. 2010, Welling et al. 2014, Wildy et al. 2014, He et al. 2014). Παρόλο που αυτή η μέθοδος προσφέρει καλά αποτελέσματα όσον αφορά τη μεταβλητότητα του συνολικού ισοδύναμου εύρους μιας BAL κοιλάδας απορρόφησης, εμφανίζει τρία πολύ σημαντικά μειονεκτήματα:

- η μέθοδος δεν είναι ευαίσθητη ως προς τις μεταβολές που εμφανίζονται σε περιορισμένα ή διακριτά φασματικά χαρακτηριστικά μιας BAL,
- στην περίπτωση που η μεταβλητότητα προκαλείται από πυκνώματα εντός της εκροής τότε η μελέτη της μεταβλητότητας του EW της συνολικής BAL δεν αντικατοπτρίζει τις μεταβολές των ιδιοτήτων των πυκνωμάτων, και
- υπάρχει η πιθανότητα να μην χαρακτηριστεί μια BAL ως μεταβαλλόμενη ενώ στην πραγματικότητα να είναι, επιδεικνύοντας μεταβολές σε μεμονωμένες συνιστώσες των οποίων η συνολική συνεισφορά έχει ως αποτέλεσμα το ισοδύναμο εύρος της BAL να παραμένει σταθερό.

2. Σύμφωνα με τη δεύτερη μέθοδο μελετάται η μεταβλητότητα επιλεγμένων κομματιών μιας πλατιάς κοιλάδας απορρόφησης (Gibson et al. 2008; Capellupo et al. 2011, 2012, 2013, Filiz Ak et al. 2013, He et al. 2015, Wang et al. 2015) μεταξύ διαφορετικών περιόδων. Ενώ η μέθοδος αυτή είναι ευαίσθητη σε μεταβολές που εμφανίζονται σε υποπεριοχές μιας BAL, εμφανίζει ένα σημαντικό μειονέκτημα.

Οι υποπεριοχές μιας BAL των οποίων μελετάται η μεταβλητότητα είναι αυθαίρετα • καθορισμένες. Για παράδειγμα, οι Gibson et al. (2008) και Capellupo et al. (2011, 2012, 2013) ορίζουν ως μεταβαλλόμενο ένα κομμάτι μιας BAL το οποίο εμφανίζει μεταβολή ως προς την έντασή του για τουλάχιστον 1200 km/s, οι Filiz Ak et al. (2013) χρησιμοποιούν ένα κριτήριο το οποίο επιτρέπει την ανίχνευση μεταβαλλόμενων περιοχών μιας BAL οι οποίες έχουν εύρος μεγαλύτερο από ~275 km/s, ενώ οι He et al. (2015) μελετούν διαστήματα ταχύτητας μεγαλύτερα από ~774 km/s. Μάλιστα, οι Filiz Ak et al. (2013) επιχειρηματολογούν ότι η επιλογή μικρότερου εύρους των ~275 km/s μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένους υπολογισμούς καθώς παρατηρησιακά σφάλματα δεν είναι δυνατόν να διακριθούν από τις μεταβαλλόμενες περιοχές, ενώ αν απαιτηθεί μεγαλύτερο εύρος τότε δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί η μεταβλητότητα στενών περιοχών μιας BAL. Τέλος, οι Wang et al. (2015) χρησιμοποιούν μία εμπειρική μέθοδο σύγκρισης φασμάτων μεταξύ δύο ή περισσότερων εποχών. Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην τοποθέτηση του ενός φάσματος μιας περιόδου επάνω στο φάσμα της άλλη περιόδου, και την εύρεση της διαφοράς τους. Από τη διαφορά των φασμάτων αναζητούν συνεχόμενες περιοχές που μεταβάλλονται μεταξύ των δύο εποχών εφαρμόζοντας συγκεκριμένους περιορισμούς. Με τον τρόπο αυτό εντοπίζουν μεταβαλλόμενα κομμάτια μιας BAL κοιλάδας απορρόφησης με εύρη μεγαλύτερα από 500 km/s. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, η μεταβλητότητα που καθορίζεται με αυτόν τον τρόπο δεν αντανακλά τη μεταβλητότητα των πραγματικών φυσικών δομών εντός της

εκροής που ευθύνονται για τις παρατηρούμενες μεταβολές μιας BAL κοιλάδας απορρόφησης.

Μελέτες της BAL μεταβλητότητας οι οποίες επικεντρώνονται σε μεταβολές συνιστωσών είναι αυτές των Vilkoviskij & Irwin (2001) και Lu & Lin (2018). Οι Vilkoviskij & Irwin (2001) παρατήρησαν αύξηση βάθους σε μεμονωμένα χαρακτηριστικά απορρόφησης στον BALQSO Q13031308. Απέδωσαν την παρατηρούμενη μεταβλητότητα σε αυξανόμενα ποσά υλικού απορρόφησης, στην γραμμή παρατήρησης, εξαιτίας μεταβολών της λαμπρότητας του κεντρικού αντικειμένου. Οι Lu & Lin (2018) βρήκαν συντονισμένη μεταβλητότητα όλων των συνιστωσών απορρόφησης της BAL Si IV στον BALQSO J002710.06-094435.3. Η παρατηρούμενη μεταβλητότητα αποδόθηκε σε συνολικές μεταβολές στην κατάσταση ιονισμού του απορροφώντος αερίου.

Αν αποδεχθούμε το μοντέλο πυκνωμάτων, σύμφωνα με το οποίο, οι BALs είναι το προϊόν σύνθεσης επιμέρους συνιστωσών (παραγόμενες σε νέφη-πυκνώματα εντός της εκροής), τότε προκειμένου να μελετηθεί η μεταβλητότητα των νεφών-πυκνωμάτων στη γραμμή παρατήρησης κρίνεται αναγκαία η χρήση μιας μεθόδου μέσω της οποίας να αναλύονται οι BALs στον ακριβή αριθμό συνιστωσών από τις οποίες αποτελούνται. Καθορίζοντας τον ακριβή αριθμό συνιστωσών καθίσταται δυνατή η μελέτη των νεφών απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης, των φυσικών συνθηκών των νεφών όπως επίσης και της μεταβλητότητας αυτών. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να καθοριστεί με μεγαλύτερη βεβαιότητα ποιος ή ποιοι μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για την παρατηρούμενη μεταβλητότητα των BALs. Την δυνατότητα αυτή προσφέρει το μοντέλο GR (Danezis et al. 2003, 2007), Lyratzi et al. (2007) και το λογισμικό ASTA (Tzimeas et al. 2019) τα οποία χρησιμοποιούνται στην εν λόγω διατριβή. Τόσο το

2.4.1. Μεταβολές στο συνεχές ιονισμού

Τα στοιχεία τα οποία καταδεικνύουν ότι οι μεταβολές στο συνεχές ιονισμού είναι υπεύθυνες για την μεταβλητότητα των BALs, είναι τα εξής:

- Συντονισμένη μεταβλητότητα μεταξύ διαφορετικών τμημάτων απορρόφησης εντός της ιδίας κοιλάδας απορρόφησης (Hamann et al. 2011, Capellupo et al. 2012, Filiz Ak et al. 2013, Wang et al. 2015; He et al. 2017). Όταν εντός μίας BAL εμφανίζονται τμήματα σε διαφορετικές ταχύτητες τα οποία εμφανίζουν συντονισμένες μεταβολές (όλα βαθαίνουν ή όλα ρηχαίνουν) το πιο πιθανό σενάριο είναι ότι οι εν λόγω μεταβολές οφείλονται στις μεταβολές του συνεχούς. Αν η συντονισμένη μεταβλητότητα αποδίδονταν σε κινήσεις νεφών, τότε θα έπρεπε νέφη σε διαφορετικές ταχύτητες, δηλαδή διαφορετικές αποστάσεις από τη μελανή οπή, να κινούνται συντονισμένα, κάτι που δεν είναι ιδιαίτερα πιθανό (Capellupo et al. 2012).
- Συντονισμένη μεταβλητότητα, περιοχών απορρόφησης ίδιας ταχύτητας μεταξύ διαφορετικών ιόντων όπως Si IV, C IV, N V (Hamann et al. 2011, Capellupo et al. 2012, Filiz Ak et al. 2013, Wang et al. 2015). Όταν μεταξύ BALs διαφορετικών

ιόντων, του ιδίου quasar, παρατηρούνται περιοχές απορρόφησης, που στην ίδια ταχύτητα απομάκρυνσης μεταβάλλονται εν φάση το πιο πιθανό σενάριο είναι ότι οι μεταβολές οφείλονται σε αλλαγές της συνεχούς ακτινοβολίας. Αν το ιονίζον συνεχές το οποίο προσπίπτει στην εκροή μεταβάλλεται, τότε είναι αναμενόμενες τέτοιες συνολικές και σύγχρονες μεταβολές μεταξύ διαφορετικών ιόντων.

- Μη μονοτονικές μεταβολές των BAL κοιλάδων απορρόφησης. Οι Gibson et al. (2010) και Capellupo et al. (2012) παρατήρησαν μεμονωμένες BALs οι οποίες εμφάνιζαν μεταβολές στην έντασή τους μεταξύ διαφορετικών εποχών αλλά στην τελευταία παρατήρηση οι ένταση των κοιλάδων επέστρεψε στην αρχική κατάσταση. Για να συμβαίνει αυτό ως αποτέλεσμα της κίνησης νεφών, θα πρέπει η κίνηση των νεφών να είναι επαναλαμβανόμενη και συντονισμένη σε διαφορετικές ταχύτητες που αντιστοιχούν σε διαφορετικές θέσεις εντός της εκροής. Συνεπώς, η μεταβολή του ιονισμού είναι το πιο πιθανό σενάριο αν αναλογιστεί κανείς ότι ούτε οι μεταβολές της συνεχούς ροής είναι μονοτονικές (Barlow 1993).
- Συγχρονισμένη μεταβλητότητα περιοχών απορρόφησης με τις μεταβολές του συνεχούς και των γραμμών εκπομπής (Wang et al. 2015). Στατιστικά παρατηρήθηκε ότι οι γραμμές απορρόφησης ρηχαίνουν/βαθαίνουν όταν το συνεχές γίνεται πιο ισχυρό/ασθενές.
- Η εμφάνιση γραμμών απορρόφησης η οποία συνοδεύεται από εξασθένιση του συνεχούς αλλά και η εξαφάνιση γραμμών απορρόφησης η οποία συνοδεύεται από ενίσχυση του συνεχούς (Wang et al. 2015).
- Συνολικές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα σε μια κοιλάδα απορρόφησης (Capellupo et al. 2012). Αν οι κινήσεις μεμονωμένων νεφών προκαλούν τις μεταβολές των BALs, τότε θα αναμένουμε μεταβολές των BALs σε συγκεκριμένες ταχύτητες και όχι μεταβολές στο συνολικό τους προφίλ.
- Συντονισμένες μεταβολές μεμονωμένων συνιστωσών εντός μιας κοιλάδας απορρόφησης (Lu & Lin 2018). Οι Lu & Lin (2018) κατάφεραν να αναλύσουν την BAL Si IV στον BALQSO J002710.06-094435.3, στις συνιστώσες από τις οποίες αποτελείται. Παρατήρησαν ότι όλες οι μεταβαλλόμενες συνιστώσες εμφάνιζαν συντονισμένη μεταβλητότητα η οποία αποδίδεται στις μεταβολές του συνεχούς.
- Οι Waters et al. (2017) έδειξαν ότι εξαιτίας της θερμικής αστάθειας, εντός της εκροής δημιουργούνται νέφη πλάσματος τα οποία διαρρηγνύονται κατά την επιτάχυνσή τους από την πίεση της ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφουν ένα μηχανισμό συνεχούς αναγέννησης και διάρρηξης νεφών σε μικρότερες δομές (clumps) ο οποίος οδηγεί τελικά σε έναν clumpy άνεμο ο οποίος επιταχύνεται με σταθερό ρυθμό. Στα πλαίσια αυτού του μηχανισμού, οι Waters et al. (2017) έδειξαν ότι η συνεχώς μεταβαλλόμενη πυκνότητα του πλάσματος (συνεχής γέννηση και επακόλουθη διάρρηξη νεφών) εξαιτίας της θερμικής αστάθειας και οι μεταβολές στο συνεχές ιονισμού δεν σχετίζονται. Αυτό σημαίνει ότι μεταβολές μεταξύ συνιστωσών εντός της ίδιας BAL ή μεταξύ των BALs διαφορετικών ιόντων.
Οι Stathopoulos et al. (2019) σε ένα δείγμα 10 BALQSOs, ανέλυσαν τις BALs Si IV και C IV στις συνιστώσες από τις οποίες αποτελούνται και μελέτησαν τη μεταβλητότητα κάθε μιας συνιστώσας μεταξύ δύο διαφορετικών περιόδων, δηλαδή τη μεταβλητότητα των νεφών απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης. Η μελέτη κατέδειξε ότι οι καμία BAL δεν εμφανίζει μεταβολές σε ολόκληρο το προφίλ της αλλά σε μεμονωμένες συνιστώσες. Επίσης, οι συνιστώσες μεταβάλλονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη γεγονός που καταδεικνύει την διακριτότητα και ανεξαρτησία των νεφών. Η μελέτη επίσης κατέδειξε ότι καμία από την άλλη γεγονός που καταδεικνύει την διακριτότητα και ανεξαρτησία των νεφών. Η μελέτη επίσης κατέδειξε ότι καμία από τις συνιστώσες δεν μεταβάλλει την ακτινική της ταχύτητα γεγονός που ενισχύει την άποψη ότι η μεταβλητότητα οφείλεται σε μεταβολές της κατάστασης ιονισμού των νεφών και όχι σε εγκάρσιες κινήσεις αυτών εντός/εκτός της γραμμής παρατήρησης. Αν οι κινήσεις των νεφών ήταν υπεύθυνες για την παρατηρούμενη μεταβλητότητα θα περιμέναμε να εντοπίσουμε μεταβολές στις ακτινικές ταχύτητες των νεφών.

2.4.2. Κινήσεις Νεφών

Τα στοιχεία τα οποία καταδεικνύουν ότι οι εγκάρσιες κινήσεις μεμονωμένων νεφών στην γραμμή παρατήρησης προκαλούν την παρατηρούμενη μεταβλητότητα των BALs είναι:

- Μη συσχέτιση μεταξύ των μεταβολών του συνεχούς και της μεταβλητότητας των BALs (Lundgren et al. 2007). Όταν οι παρατηρούμενες μεταβολές της μονοχρωματικής λαμπρότητας δεν συσχετίζονται με τις μεταβολές των BALs δύο είναι τα πιθανά σενάρια, είτε ότι η μεταβλητότητα της πηγής του συνεχούς δεν είναι σε φάση με τη μεταβλητότητα των BALs είτε ότι κάποιος άλλος μηχανισμός ευθύνεται για τις μεταβολές στις εντάσεις των BALs, όπως είναι η μεταβολές στον συντελεστή κάλυψης λόγο κίνησης μεμονωμένων νεφών (Lundgren et al. 2007).
- Η ανάδυση ή εξαφάνιση μιας BAL (π.χ. Si IV, C IV) χωρίς να παρατηρείται μεταβολή στην αντίστοιχη BEL (Hamann et al. 2008). Είναι γεγονός πως ο ιονισμός των BELs ελέγχεται από την ίδια, μακρινού υπεριώδους, ροή η οποία ελέγχει και τις απορροφήσεις των Si IV και C IV και ότι οι BELs αποκρίνονται πρώτες στις μεταβολές του συνεχούς (Hamann et al. 2008). Έτσι, πιο πιθανό σενάριο για την εμφάνιση ή εξαφάνιση μιας BAL, χωρίς παρατηρούμενη μεταβολή της αντίστοιχης BEL, είναι πιθανό πως οφείλεται σε είσοδο ή έξοδο νέφους απορρόφησης από της γραμμής παρατήρησης.
- Μεταβλητότητα η οποία λαμβάνει χώρα σε διακριτές περιοχές, εύρους μερικών εκατοντάδων ή χιλιάδων km/s μιας BAL κοιλάδας απορρόφησης (Gibson et al. 2008, Filiz Ak et al. 2013, Capellupo et al. 2011, 2012, 2013). Αν ο υπεύθυνος μηχανισμός πρόκλησης της μεταβλητότητας των BALs ήταν το μεταβαλλόμενο συνεχές θα αναμέναμε συνολικές μεταβολές μιας BAL κοιλάδας. Το γεγονός ότι μεταβάλλονται υποπεριοχές μιας BAL καταδεικνύει την κίνηση νεφών στην γραμμή παρατήρησης.

- Γειτονικές περιοχές μιας BAL κοιλάδας απορρόφησης οι οποίες μεταβάλλονται ανεξάρτητα (Gibson et al. 2008). Αν οι μεταβολές του συνεχούς προκαλούσαν την μεταβλητότητα των BALs θα αναμέναμε γειτονικές περιοχές μιας BAL να μην μεταβάλλονται ανεξάρτητα, να μεταβάλλονται συγχρονισμένα και να υπόκεινται στο ίδιο είδος μεταβολής (και η δύο να βαθαίνουν ή και οι δύο να ρηχαίνουν). Οι Gibson et al. (2008) επιχειρηματολογούν ότι οι BAL απορροφητές αποτελούνται από πυκνώματα (clumps) τα οποία εκτείνονται σε εύρος ≤ 2000 km/s, καλύπτουν περίπου το 20% της πηγής του συνεχούς (τα πυκνώματα θεωρούνται οπτικά πυκνά) και ότι αυτά μπορεί να είναι όμοια με τα πυκνώματα που προκαλούν τις mini-BALs ή ακόμη και τις NALs.
- Η μη συντονισμένη μεταβολή διαφορετικών τμημάτων μιας κοιλάδας απορρόφησης (Capellupo et al. 2011, 2012, 2013). Οι προαναφερθείσες μελέτες βρήκαν εντός των ιδίων BALs, περιοχές σε συγκεκριμένες ταχύτητες οι οποίες ρήχαιναν ενώ περιοχές σε άλλες ταχύτητες οι οποίες βάθαιναν. Μια τέτοια συμπεριφορά μπορεί να ερμηνευθεί μόνο μέσω της εγκάρσιας κίνησης μεμονωμένων νεφών στην της γραμμής παρατήρησης. Για παράδειγμα είναι δυνατόν ένα νέφος με συγκεκριμένη ταχύτητα και απόσταση από τη μελανή οπή να εισέρχεται στη γραμμή παρατήρησης ενώ ένα άλλο νέφος σε άλλη ταχύτητα να εξέρχεται από αυτή. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα μια περιοχή της BAL να βαθαίνει (ή να αναδύεται) ενώ μια άλλη περιοχή της ίδιας BAL να ρηχαίνει (ή να εξαφανίζεται). Οι περιοχές της BAL που έμειναν αμετάβλητες, οφείλονται σε νέφη τα οποία παρέμειναν στη γραμμή παρατήρησης.
- Η συχνότερη εμφάνιση μεταβλητότητας στις περιοχές των BALs μεγάλης ακτινικής ταχύτητας, καταδεικνύει την κίνηση νεφών καθώς το ταχύτατα κινούμενο υλικό είναι πιο πιθανό να μεταβάλλεται (Capellupo et al. 2011).
- Μη συντονισμένη μεταβλητότητα των BALs Si IV και C IV εντός του ιδίου quasar (Capellupo et al. 2012). Πιο συγκεκριμένα, οι Capellupo et al. (2012) παρατήρησαν, στον ίδιο quasar, περιοχές των BALs Si IV και C IV στην ίδια ταχύτητα απομάκρυνσης, οι οποίες δεν μεταβάλλονταν συντονισμένα. Δηλαδή η περιοχή του Si IV βάθαινε ενώ η αντίστοιχη περιοχή του C IV (στην ίδια ταχύτητα) ρήχαινε ή το αντίστροφο. Το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι για αυτή τη συμπεριφορά δεν ευθύνονται οι μεταβολές του συνεχούς γιατί τότε θα περιμέναμε συντονισμένη μεταβλητότητα μεταξύ Si IV και C IV. Το δεύτερο και ίσως πιο σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι οι απορροφητές Si IV και C IV, αποτελούν πυκνώματα με διαφορετικό συντελεστή κάλυψης. Μάλιστα όπως έχει δειχθεί, τα ιόντα Si IV και C IV είναι δυνατόν να ανήκουν στο ίδιο νέφος-πύκνωμα και ότι ο C IV, εξού και οι διαφορετικό ποσοστό της επιφάνειας του νέφους από ότι ο C IV, εξού και οι διαφορετικοί συντελεστές κάλυψης (Hamann et al. 2001, Hamann & Sabra 2004, Capellupo et al. 2012).

Κεφάλαιο 3

Τα ιόντα Si IV και C IV

3.1. Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, οι πανίσχυρες εκροές των QSOs γίνονται έκδηλες μέσω των πλατιών γραμμών απορρόφησης γραμμών συντονισμού όπως οι Si IV, C IV, N V, Lya, O VI, P V, Mg II. Προκειμένου να μελετηθούν οι πλατιές γραμμές απορρόφησης των Si IV και C IV, που εμφανίζονται στα φάσματα των BALQSOs κρίνεται αναγκαία, η χρήση εκείνων των αρχών της ατομικής φυσικής που καθορίζουν βασικά χαρακτηριστικά των εν λόγω φασματικών γραμμών. Για το λόγο αυτό, παρουσιάζονται συνοπτικά, οι βασικές αρχές της ατομικής θεωρίας και της ατομικής φασματοσκοπίας που χρησιμοποιούνται στην εν λόγω μελέτη.

3.2. Γραμμές συντονισμού

Οι φασματικές γραμμές είναι το αποτέλεσμα μεταβάσεων μεταξύ ενεργειακών επιπέδων, όπως αυτές μεταξύ δέσμιων επιπέδων ενός ηλεκτρονίου σθένους σε ένα άτομο ή ιόν (δέσμιες-δέσμιες μεταβάσεις). Διέγερση, από χαμηλότερα σε υψηλότερα ενεργειακά επίπεδα μπορεί να λάβει χώρα μέσω απορρόφησης κινητικής ενέργειας (συγκρουσιακή διέγερση) ή μέσω απορρόφησης φωτονίου (ακτινοβολιακή διέγερση). Με παρόμοιο τρόπο, αποδιέγερση, από υψηλοτέρα σε χαμηλότερα ενεργειακά επίπεδα μπορεί να λάβει χώρα μέσω συγκρουσιακή αποδιέγερση) ή μέσω απορρόφησης φωτονίου (ακτινοβολιακή διέγερση). Με παρόμοιο τρόπο, αποδιέγερση, από υψηλοτέρα σε χαμηλότερα ενεργειακά επίπεδα μπορεί να λάβει χώρα μέσω συγκρούσεων (συγκρουσιακή αποδιέγερση) ή μέσω εκπομπής φωτονίου (ακτινοβολιακή αποδιέγερση). Η ανταλλαγή ενέργειας συμβαίνει μέσω κβάντων ενέργειας συχνότητας $hv = \Delta E_{mn}$ όπου $\Delta E_{mn} = E_m - E_n$ είναι η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των επιπέδων m και n (m>n) της δέσμιας-δέσμιας μετάβασης. Τα φωτόνια που παίρνουν μέρος στην διαδικασία χαρακτηρίζονται από μήκος κύματος $\lambda = hc/\Delta E_{mn}$.

Επειδή, ο πληθυσμός των διεγερμένων επιπέδων είναι σε γενικές γραμμές πολύ μικρός σε σχέση με τον πληθυσμό της θεμελιώδους κατάστασης, η απορρόφηση (ή εκπομπή) είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση μεταβάσεων από ή προς την θεμελιώδη κατάσταση. Έτσι, στην περίπτωση που η μετάβαση γίνεται μεταξύ του θεμελιώδους επιπέδου ενός ατόμου ή ιόντος και του πρώτου ενεργειακού επιπέδου (principal series: s-p), οι φασματικές γραμμές που παράγονται καλούνται γραμμές συντονισμού και είναι οι πιο έντονες γραμμές στο φάσμα ενός ατόμου ή ιόντος.

3.3. Η έννοια του multiplet (πολλαπλότητας) των γραμμών συντονισμού

Όσο ο αριθμός των ηλεκτρονίων αυξάνεται τα φάσματα των ατόμων γίνονται ολοένα και πιο πολύπλοκα. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιες σημαντικές αλλά σχετικά απλές αρχές οι οποίες διευκολύνουν τη μελέτη των φασμάτων των πολύ-ηλεκτρονικών ατόμων. Όπως προαναφέρθηκε, φασματικές γραμμές (εκπομπής ή απορρόφησης) μπορούν να παραχθούν όταν ένα άτομο υπόκειται σε μια μετάβαση με ενεργειακή διαφορά $|\Delta E_{mn}|$ και εκπέμπει ή απορροφά ένα φωτόνιο συχνότητας ν = $\Delta E_{mn}/h$. Επομένως, ένα ατομικό φάσμα δίνει πληροφορίες που σχετίζονται με τις ενέργειες των ηλεκτρονίων στο άτομο. Παρόλα αυτά, τα πραγματικά ενεργειακά επίπεδα δεν παρέχονται αποκλειστικά από τις ενέργειες των τροχιακών καθώς τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, με διάφορους τρόπους, συνεισφέροντας έτσι στον καθορισμό των ενεργειακών σταθμών.

Μία τέτοια περίπτωση είναι η σύζευξη τροχιακής στροφορμής και ιδιοστροφορμής (spin-orbit coupling or L-S coupling). Το ηλεκτρόνιο είναι ηλεκτρικά φορτισμένο και, επομένως, τόσο η κίνησή του γύρω από τον πυρήνα όσο και η ιδιοπεριστροφή του (spin) δημιουργούν μαγνητικά πεδία. Άρα το ηλεκτρόνιο χαρακτηρίζεται από μαγνητική ροπή εξαιτίας της ιδιοστροφορμής του αλλά και από μαγνητική ροπή εξαιτίας του γύρω από τον θετικά φορτισμένο πυρήνα. Το πόσο ισχυρή είναι αυτή η σύζευξη και η επίδρασή της στα ενεργειακά επίπεδα του ατόμου εξαρτάται από τους σχετικούς προσανατολισμούς των δύο διαφορετικών στροφορμών. Η συνολική στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο επιμέρους στροφορμών. Έτσι, όταν τα ανύσματα των δύο στροφορμών είναι αντηπαράλληλα, τότε η συνολική στροφορμή είναι ελάχιστη. Η συνολική στροφορμή ενός ηλεκτρονίου περιγράφεται από τους κβαντικούς αριθμούς j και m_i με j = $\ell \pm 1/2$.

Στην περίπτωση των πολυηλεκτρονικών ατόμων, όλες οι τροχιακές στροφορμές και ιδιοστροφορμές των ηλεκτρονίων πρέπει να προστεθούν διανυσματικά $(\mathbf{L} = \sum \boldsymbol{\ell}_i, \mathbf{S} = \sum \mathbf{s}_i)$ προκειμένου να προκύψει η συνολική στροφορμή του ατόμου $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$ (ο παράγοντας L παίρνει μόνο ακέραιες τιμές ενώ ο S παίρνει ακέραιες και ημιακέραιες τιμές). Η δυνατότητα της κατά διάφορους τρόπους σύνθεσης δεδομένων ανυσμάτων, όπως τα L, S, έχει ως αποτέλεσμα να προκύπτουν διάφορες τιμές του J (Slater 1929).

Ο αριθμός των διαφόρων δυνατοτήτων σύνθεσης καλείται πολλαπλότητα r (multiplicity) και δίνεται από τη σχέση (Slater 1929):

$$r = 2S + 1 \tag{3.1}$$

Άρα η πολλαπλότητα (multiplicity) ισούται με τον αριθμό των πιθανών προσανατολισμών του S ως προς τον L, και εν συνεπεία με τον αριθμό των εκφυλισμένων ενεργειακών επιπέδων τα οποία διαφέρουν ως προς την ενέργεια αλληλεπίδρασης spin-orbit. Δηλαδή, ένα multiplet περιλαμβάνει το σύνολο των μεταβάσεων μεταξύ δύο καταστάσεων, για παράδειγμα ${}^{2}S_{1/2} \rightarrow {}^{2}P_{3/2}$

3.3.1. Ο συμβολισμός των ενεργειακών καταστάσεων

Όπως είναι φανερό είναι αναγκαίο να εισάγουμε έναν συμβολισμό για να διακρίνουμε τα ενεργειακά επίπεδα που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση L-S. Συγκεκριμένα κάθε ενεργειακό επίπεδο χαρακτηρίζεται από τρεις κβαντικούς αριθμούς J, L, και S και παριστάνεται με τη μορφή:

$$n^{2S+1}L_{J}$$
(3.2)

όπου

n: κύριος κβαντικός αριθμός S: συνολικό σπιν του ατόμου ή ιόντος J: συνολική στροφορμή του ατόμου ή ιόντος 2S+1: η πολλαπλότητα της ενεργειακής κατάστασης L: συνολική τροχιακή στροφορμή του ατόμου ή ιόντος

Ta 2S+1 και J εμφανίζονται ως αριθμοί, ενώ το L παριστάνεται με γράμμα, με βάση τον παρακάτω κανόνα:

S $ext{ } ext{ } e$

 $P \ \ \text{standard} L = 1$

 $D \ \ \text{dtank } L=2$

F όταν L = 3, κλπ.

Αν S=0, η πολλαπλότητα είναι 1 και ο ατομικός ενεργειακός όρος ονομάζεται απλός (singlet). Όταν S=1/2, η πολλαπλότητα είναι 2 και ο ατομικός ενεργειακός όρος ονομάζεται διπλός (doublet), και όταν S=1, η πολλαπλότητα είναι 3 και ο ατομικός ενεργειακός όρος ονομάζεται τριπλός (triplet), κοκ. Για κάθε τρόπο σύνθεσης των ανυσμάτων L και S (διαφορετικά J) προκύπτει και μια διαφορετική φασματική γραμμή. Για το σύνολο των φασματικών αυτών γραμμών λέμε ότι ανήκουν στην αυτή πολλαπλότητα και βρίσκονται αρκετά κοντά στη φασματική περιοχή. Στους πίνακες καταγραφής των φασματικών γραμμών των διαφόρων ιόντων, αυτές καταγράφονται, τις περισσότερες φορές, κατά πολλαπλότητες.

Στην σύζευξη τροχιακής στροφορμής και ιδιοστροφορμής οφείλεται το φαινόμενο της λεπτής υφής κατά το οποίο πραγματοποιείται ο διαχωρισμός/σχίσιμο των φασματικών γραμμών ενός ατόμου ή ιόντος σε δύο η περισσότερες συνιστώσες, με μήκη κύματος που διαφέρουν μεταξύ τους ελάχιστα.

Πολλές φορές υπάρχει η πιθανότητα το ηλεκτρόνιο, προσλαμβάνοντας ακτινοβολία, να μεταφερθεί σε στάθμες διέγερσης που να έχουν κοινούς τους κβαντικούς αριθμούς L και S, αλλά που να διαφέρουν κατά τον κβαντικό αριθμό J. Αυτό σημαίνει ότι οι αντίστοιχες στάθμες ενέργειας θα βρίσκονται πολύ κοντά και ως εκ τούτου θα σχηματίζονται περισσότερες γραμμές συντονισμού, των οποίων τα μήκη κύματος θα διαφέρουν ελάχιστα.

Το φαινόμενο της λεπτής υφής είναι ιδιαίτερα σημαντικό λόγω δε της συχνής εμφάνισής του, οι αντίστοιχες φασματικές γραμμές συντονισμού συνήθως παρουσιάζουν μεγάλη ένταση και είναι πάντα παρατηρήσιμες σ' ένα φάσμα.

Οι γραμμές συντονισμού, απορρόφησης ή εκπομπής υπακούουν σε κάποιους περιορισμούς που τίθενται μέσω της ατομικής φυσικής, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν πάντοτε:

- Την ίδια ακτινική μετατόπιση. Καθώς ο διαχωρισμός μηκών κύματος μεταξύ των γραμμών συντονισμού είναι καθορισμένος, η οποιαδήποτε ακτινική μετατόπιση εμφανίζεται, θα πρέπει να είναι η ίδια για όλες τις γραμμές. Άλλωστε, το υλικό το οποίο παράγει κάθε μία από τις γραμμές συντονισμού βρίσκεται στην ίδια περιοχή και ως εκ τούτου οι γραμμές συντονισμού δεν μπορεί να εμφανίζουν διαφορετική ταχύτητα.
- 2. Το ίδιο εύρος (FWHM). Όπως προαναφέρθηκε, οι γραμμές συντονισμού προέρχονται από ιόντα της ίδιας περιοχής. Συνεπώς, τα αίτια που συνεισφέρουν στην διεύρυνση των γραμμών συντονισμού είναι τα ίδια για όλες τις γραμμές (φυσική διεύρυνση, θερμική διεύρυνση ή/και διεύρυνση λόγω συγκρούσεων, μη-θερμική διεύρυνση δηλαδή διεύρυνση λόγω μικρό-τυρβώδους ροής microturbulent broadening, ιδιοπεριστροφή της περιοχής που παράγει τις φασματικές γραμμές-rotational broadening). Έτσι, όλες οι συνιστώσες μιας συγκεκριμένης μετάβασης συντονισμού, χαρακτηρίζονται από το ίδιο φυσικό εύρος, την ίδια θερμική διεύρυνση (καθώς u_{thermal} = $\sqrt{2kT_K/m}$ και τα ιόντα που παράγουν αυτές τις γραμμές, χαρακτηρίζονται από την ίδια Τ_K).
- 3. Διαφορετικό οπτικό βάθος στο κέντρο της γραμμής το οποίο καθορίζεται από τα oscillator-strengths¹⁹. Πιο συγκεκριμένα, ο λόγος των οπτικών βαθών, στο κέντρο των γραμμών, ισούται με το λόγο των oscillator strengths (Savage & Sembach 1991; Verner et al. 1994).

3.3.2. Φυσική σημασία

Αν έχουμε έναν αριθμό ιόντων ενός στοιχείου π.χ. Fe II, όλα τα ιόντα Fe II έχουν το ίδιο δυναμικό ιονισμού δηλαδή έχουν διώξει τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων τους. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι έχουν την ίδια ταξινόμηση ηλεκτρονίων σε στοιβάδες, άλλες περισσότερο και άλλες λιγότερο πολυπληθείς. Σε πρακτικό επίπεδο η κατάταξη σε multiplets από μικρότερο σε μεγαλύτερο μας δίνει μια φθίνουσα στατιστική κατάσταση του παραπάνω πλήθους. Για παράδειγμα αν ιόντα Fe II ανήκουν στο multiplet 1 αυτό σημαίνει ότι είναι περισσότερο πληθυσμιακά από ιόντα Fe II που ανήκουν στο multiplet

¹⁹ Ο παράγοντας oscillator strength (ισχύς ταλαντωτή) είναι ένας αδιάστατος αριθμός που χρησιμοποιείται για την σύγκριση διαφορετικών ενεργειακών μεταβάσεων. Ορίζεται ως ο λόγος της έντασης μιας ατομικής μετάβασης προς την θεωρητική ένταση της μετάβασης στο πλαίσιο του μοντέλου του αρμονικού ταλαντωτή. Από φυσικής άποψης ο εν λόγω παράγοντας αποτελεί ένα μέτρο του ρυθμού απορρόφησης ενέργειας από το πεδίο ακτινοβολίας σε σχέση με την ρυθμό απορρόφησης ενέργειας από το πεδίο ακτινοβολίας σε σχέση με την ρυθμό απορρόφησης ενέργειας από το πεδίο ακτινοβολίας σε σχέση με την ρυθμό απορρόφησης ενέργειας από το πεδίο ακτινοβολίας σε σχέση με την ρυθμό απορρόφησης ενέργειας από το πεδίο ακτινοβολίας σε σχέση με την ουσίας λοιπόν ο παράγοντας oscillator strength εκφράζει την πιθανότητα εκπομπής ή απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όταν λαμβάνει χώρα μια μετάβαση μεταξύ διαφορετικών ενεργειακών επιπέδων, δηλαδή την κβαντομηχανική πιθανότητα να πραγματοποιηθεί μια μετάβαση μεταξύ δύο καταστάσεων (Robinson 1996). Σημειώνεται ότι ο εν λόγω παράγοντας υπόκειται στους κβαντομηχανικούς κανόνες επιλογής, δηλαδή στο σύνολο των περιορισμών που καθορίζουν την πιθανότητα ένα σύστημα να μεταβεί από μία ενεργειακή κατάσταση σε άλλη ή αν δεν θα μπορέσει να πραγματοποιήσει τη μετάβαση.

5 ή multiplet 189. Αυτό σημαίνει ότι οι ενεργειακές καταστάσεις των ιόντων Fe II που δημιουργούν το multiplet 1 στη φύση είναι πιο διαδεδομένες (συνηθέστερες). Όπως καταλαβαίνουμε η εσωτερική ενεργειακή κατάσταση των ιόντων που ανήκουν σε ένα multiplet είναι ριζικά διαφορετικές από την εσωτερική κατάσταση των ιόντων του άλλου multiplet. Όσο πιο κοντινά είναι τα multiplets τόσο πιο κοντά είναι οι ενεργειακές καταστάσεις. Αλλά και μέσα στο ίδιο multiplet οι ενεργειακές καταστάσεις των ιόντων είναι ελαφρώς διαφορετικές. Αυτό σημαίνει ότι και τα ιόντα που περιλαμβάνονται στο ίδιο multiplet μπορούν να χωριστούν σε υποομάδες που δημιουργεί τις διαφορετικές φασματικές γραμμές του ίδιου multiplet (εξ ου και οι διαφορετικές εντάσεις που αναφέραμε στην αρχή).

3.4. Τριπλά ιονισμένος άνθρακας (C IV)

Ο C IV ανήκει στην ισοηλεκτρονική ακολουθία του Λιθίου, με κατανομή ηλεκτρονίων $1s^22s$, θεμελιώδες επίπεδο το ${}^2S_{1/2}$ και ενέργεια ιονισμού 64.492 eV (Kramida et al. 2018). Ο C IV χαρακτηρίζεται από 91 διαφορετικά επίπεδα από τα οποία παράγονται 228 φασματικές γραμμές από τις οποίες οι 224 έχουν ταξινομημένα ενεργειακά επίπεδα. Οι 224 φασματικές γραμμές είναι ταξινομημένες με τη σειρά τους σε 96 multiplet. Από τα 96 multiplet το σημαντικότερο (με μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης και μεγαλύτερων σχετικών εντάσεων) είναι το multiplet No. 1 το οποίο αποτελεί διπλέτα συντονισμού εξαιτίας των μεταβάσεων $2p {}^2P_{3/2} → 2s {}^2S_{1/2}$ (λ 1548.187 Å) και $2p {}^2P_{1/2} → 2s {}^2S_{1/2}$ (λ 1550.772 Å). Η συνιστώσα μικρότερου μήκους κύματος (λ 1548.187 Å) καλείται μπλε συνιστώσα ενώ η μεγαλύτερου μήκους κύματος (λ 1550.772 Å) καλείται κόκκινη συνιστώσα.

Οι εν λόγω γραμμές δημιουργούνται σε θερμοκρασίες $T \sim 10^4 - 10^5$ K με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται από θερμικά εύρη u_{th} ≈ 4 km/s (FWHM ≈ 6 km/s) για $T = 10^4$ K, u_{th} ≈ 12 km/s (FWHM ≈ 20 km/s) για $T = 10^5$ K. Η διαφορά ταχυτήτων μεταξύ μπλε και κόκκινης συνιστώσας είναι ~500 km/s.

Οι γραμμές συντονισμού του C IV, λλ 1548.187, 1550.772 Å χαρακτηρίζονται από oscillator strengths f_{ik} 0.19 και 0.0952 αντίστοιχα. Όπως προαναφέρθηκε, ο λόγος των οπτικών βαθών της μπλε προς την κόκκινη συνιστώσα είναι καθορισμένος και ίσος με το λόγο των oscillator strengths δηλαδή, $\tau_b/\tau_r \approx 2$ (Savage & Sembach 1991; Verner et al. 1994).

Ο πλήρης κατάλογος των multiplet του C IV και η ταξινόμησή τους παρέχεται από την Moore (1971). Στον Πίνακα 3.1 δίνονται τα multiplet του C IV στην υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Moore 1950).

3.5. Τριπλά ιονισμένο πυρίτιο (Si IV)

Το Si IV ανήκει στην ισοηλεκτρονική ακολουθία του Νατρίου, με κατανομή ηλεκτρονίων $1s^2 2s^2 2p^6 3s$, θεμελιώδες επίπεδο το $^2S_{1/2}$ και ενέργεια ιονισμού 45.14179 eV (Kramida et al. 2018). Το Si IV χαρακτηρίζεται από 55 διαφορετικά επίπεδα από τα

οποία παράγονται 332 φασματικές γραμμές από τις οποίες οι 314 έχουν ταξινομημένα ενεργειακά επίπεδα. Οι 314 φασματικές γραμμές είναι ταξινομημένες με τη σειρά τους σε 112 multiplet. Από τα 112 multiplet το σημαντικότερο (με μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης και μεγαλύτερων σχετικών εντάσεων) είναι το multiplet No. 1 το οποίο αποτελεί διπλέτα συντονισμού εξαιτίας των μεταβάσεων 3p ${}^{2}P_{3/2} \rightarrow 3s \, {}^{2}S_{1/2}$ (λ 1393.755 Å) και 3p ${}^{2}P_{1/2} \rightarrow 3s \, {}^{2}S_{1/2}$ (λ 1402.77 Å). Η συνιστώσα μικρότερου μήκους κύματος (λ 1393.755 Å) καλείται μπλε συνιστώσα ενώ η μεγαλύτερου μήκους κύματος (λ 1402.77 Å) καλείται κόκκινη συνιστώσα.

Οι εν λόγω γραμμές δημιουργούνται σε θερμοκρασίες $T \sim 10^4 - 10^5$ K με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται από θερμικά εύρη $u_{th} \approx 2.5$ km/s (FWHM ≈ 4 km/s) για $T = 10^4$ K, $u_{th} \approx 8$ km/s (FWHM ≈ 13 km/s) για $T = 10^5$ K. Η διαφορά ταχυτήτων μεταξύ μπλε και κόκκινης συνιστώσας είναι ~1930 km/s.

Οι γραμμές συντονισμού του Si IV, λλ 1393.755, 1402.77 Å χαρακτηρίζονται από oscillator strengths f_{ik} 0.513 και 0.255 αντίστοιχα. Όπως προαναφέρθηκε, ο λόγος των οπτικών βαθών της μπλε προς την κόκκινη συνιστώσα είναι καθορισμένος και ίσος με το λόγο των oscillator strengths δηλαδή $\tau_b/\tau_r \approx 2$ (Savage & Sembach 1991; Verner et al. 1994).

Ο πλήρης κατάλογος των multiplet του Si IV και η ταξινόμησή τους παρέχεται από την Moore (1965). Στον Πίνακα 3.2 δίνονται τα multiplet του Si IV στην υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Moore 1950).

C IV						C IV										
•		Int	E	P		Multiplet			Per		EP			Multiplet	e	
1 .	Ref		Low	High			(No)		Rei	Int	Low	High		(No)		
Vac 1548. 195 1550. 768	Â	20 19	0. 00 0. 00	7. 97 7. 96	X-1X X- X	2.	² S - 2p ² P° (1)	Vac 289. 230 289. 143	Å	10 9	7. 97 7. 96	50. 66 50. 66	1%-2%	2p	*P° – 4d (9)	۰D
312. 418 312. 455	*	15 14	0.00 0.00	39. 51 39. 51	¥-1% %-%	2:	¹ S - 3p ¹ P° (2)	259. 542 259. 471	*	7	7. 97 7. 96	55. 54 55. 54	1½-2½ ½-1½	2p	³ P° 5d (10)	D،
244. 907	•	10	0. 00	50. 41	¥-	28	² S - 4p ² P° (3)	245. 830 245. 775	Å	5d 4d	7. 97 7. 96	58. 19 58. 19	1%-2% %-1%	2p	*P° - 6d (11)	۶D
222. 791	A	7	0. 00	55. 41	¥-	28	² S - 5p ³ P° (4)	Air								
212. 421	A	5	0. 00	58. 12	*-	28	³ S - 6p ³ P° (5)	2698. 70 2697. 73	Â	2	50. 41 50. 41	54. 98 54. 98	1%- %	4 p	(12)	*5
419. 714 419. 525	4	14 13	7. 97 7. 96	37. 39 37. 39	1%- % %- %	2p	*P°-38 *S (6)	2595. 14	۸	2d	50. 66	55. 41		4d	*D-5p (13)	۰P°
384. 178 384. 032	1	17 16	7. 97 7. 96	40. 11 40. 11	1%-2% %-1%	2p	*P°3d *D (7)	2524. 40	۸	4d	50. 66	55. 54		4 d	*D-5/ (14)	٩Fo
296. 951 296. 857	Å	7 6	7.97 7.96	49. 55 49. 55	1%- % %- %	2p	*P°-4: *S (8)	2529. 97	A	6d	50. 67	55. 55		45	•F°-5g (15)	٩G

Πίνακας 3.1. Ταξινομημένα multiplet του C IV στην υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Moore 1950).

Πίνακας 3.1. Ταξινομημένα multiplet του Si IV στην υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Moore 1950).

τ.	Def		Е	Р		Multiplet (No)	
IA	Rei	Int	Low	High	,		
Vac 1393. 73 1402. 73	A A	10 8	0. 00 0. 00	8. 86 8. 80	¥-1¥ %- %	38 ² S - 3p ² P° (1)	
457. 7	в	(3)	0. 00	26. 97	%−	3s ² S - 4p ² P° (2)	
1128. 326 1122. 495	A A	5 4	8. 86 8. 80	19. 80 19. 80	1½-2½ ½-1½	3p ² P°-3d ² D (3)	
818. 121 815. 060	A A	4 3	8. 86 8. 80	23. 95 23. 95	1½- ½ ½- ½	3p ² P ^o 4s ² S (4)	

Siı	V
-----	---

3.6. Βήματα για την αναγνώριση φασματικών γραμμών στο φάσμα ενός quasar

Προτού γίνει οι αναγνώριση των φασματικών γραμμών που δημιουργούνται από τον QSO, προηγείται η αναγνώριση από πίνακες των μεσοαστρικών (interstellar) φασματικών γραμμών. Όπως είναι γνωστό η ακτινική μετατόπιση των μεσοαστρικών φασματικών γραμμών απορρόφησης πρέπει να είναι μηδενική. Αν όμως η ακτινική ταχύτητα των μεσοαστρικών γραμμών απορρόφησης πρέπει να είναι μηδενική. Αν όμως η ακτινική ταχύτητα των μεσοαστρικών γραμμών απορρόφησης πρέπει να είναι μηδενική. Αν όμως η ακτινική ταχύτητα των μεσοαστρικών γραμμών απορρόφησης πρέπει να είναι μηδενική. Αν όμως το μηδέν τότε η αντίστοιχη μετατόπιση Δλ αποτελεί σφάλμα του οργάνου καταγραφής και πρέπει να αφαιρείται από τις τιμές των ακτινικών ταχυτήτων που θα προκύψουν από τη μελέτη των φασματικών γραμμών.

Από τους πίνακες των ταξινομημένων φασματικών γραμμών μπορούμε να δούμε το multiplet και την σχετική ένταση των φασματικών γραμμών σε συνθήκες εργαστηρίου.

Προσπαθούμε να αναγνωρίσουμε όσες γραμμές μπορούμε από το multiplet 1 ενός συγκεκριμένου ιόντος. Αυτό σημαίνει ότι από το multiplet 1 θα αναγνωρίσουμε φασματικές γραμμές έως μιας ορισμένης έντασης, δηλαδή φασματικές γραμμές μέχρι ενός ορατού γεωμετρικού βάθους. Πέραν αυτής της έντασης δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε καμιά φασματική γραμμή λόγω του ελαχιστότατου γεωμετρικού βάθους της που την κάνει να χάνεται μέσα στον θόρυβο του οργάνου.

Έστω ότι από το multiplet 1 ενός ιόντος μπορούμε να αναγνωρίσουμε τιμές εντάσεως μέχρι 300. Στη συνέχεια προσπαθούμε να αναγνωρίσουμε φασματικές γραμμές του multiplet 2. Στο multiplet 2 δεν μπορούμε να αναγνωρίσουμε γραμμές εντάσεως μικρότερης του 300. Έστω π.χ. ότι αναγνωρίζουμε γραμμές μέχρι εντάσεως 400. Συνεχίζουμε την ίδια διαδικασία στο multiplet 3 γνωρίζοντας ότι δεν μπορούμε να αναγνωρίσουμε φασματικές γραμμές εντάσεως μικρότερης από 400 κ.ο.κ. μέχρι εξάντλησης όλων των multiplets του συγκεκριμένου ιόντος.

Πολλές φορές στην θέση των μηκών κύματος των φασματικών γραμμών του προηγουμένου ιόντος που δεν μπορούμε να διακρίνουμε λόγω ελαχιστότατου

γεωμετρικού βάθους, μπορούμε να παρατηρήσουμε την ύπαρξη φασματικών γραμμών όχι αμελητέου βάθους. Αυτές οι φασματικές γραμμές δεν ανήκουν στο προηγούμενο ιόν αλλά σε κάποιο άλλο του οποίου κάποια φασματική γραμμή βρίσκεται πολύ κοντά στην φασματική περιοχή του μελετώμενου ιόντος.

Σε κάποιες περιπτώσεις, αναγνωρίζοντας με τον τρόπο που αναφέραμε προηγουμένως τις γραμμές ενός ιόντος multiplet προς multiplet, θα παρατηρήσουμε ότι το βάθος των γραμμών δεν ακολουθεί τους κανόνες που θέσαμε προηγουμένως. Αυτό, τις περισσότερες φορές, οφείλεται στη μίξη (blend) της φασματικής γραμμής του ιόντος που μελετάμε με τη φασματική γραμμή κάποιου (ή κάποιων) άλλου ιόντος γεγονός που βαθαίνει περισσότερο την μελετώμενη φασματική γραμμή.

Σε έκτακτες περιπτώσεις (μη συνηθισμένες) ο κανόνας των οπτικών βαθών φασματικών γραμμών του ίδιου multiplet, καταστρατηγείται λόγω της ιδιόμορφης κατάστασης στην οποία βρίσκονται τα ιόντα που δημιουργούν τις εν λόγω φασματικές γραμμές (δες § 2.3).

Για να γίνει μια πρώτη αναγνώριση των βασικών φασματικών γραμμών ενός φάσματος κάνουμε όλη την προηγούμενη διαδικασία για τις φασματικές γραμμές όλων των ιόντων που μπορούν να εμφανισθούν στο συγκεκριμένο φάσμα που μελετάμε.

Όπως είναι προφανές αν μελετάμε μια συγκεκριμένη περιοχή (π.χ. UV 1000 – 3000 Å) στην οποία δεν καταγράφεται το multiplet 1 κάποιου μελετώμενου ιόντος, αρχίζουμε τη μελέτη του ιόντος από το μικρότερο multiplet που εμφανίζεται στην περιοχή αυτή.

Κεφάλαιο 4

Η μέθοδος μελέτης των BALs Si IV και C IV

4.1. Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στα Κεφ. 1 και 2, οι BALQSOs επιδεικνύουν έντονα, ιδιαίτερα πλατιά αλλά και πολύπλοκα προφίλ απορρόφησης, μεγάλης ποικιλομορφίας, τα οποία μεταβάλλονται τόσο σε μικρές όσο και σε μεγάλες χρονικές κλίμακες. Τα πολύπλοκα προφίλ των BALs δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν, στο σύνολό τους, ικανοποιητικά μέσω μίας και μοναδικής συνάρτησης γραμμής, δηλαδή μέσω μίας εκ των κλασικών κατανομών (Gauss ή Lorentz ή Voigt κ.τ.λ.) ενώ τα μοντέλα ομαλών και ομοιογενών ανέμων είναι ανεπαρκή στο να περιγράψουν όλους τους τύπους των BAL προφίλ. Επιπροσθέτως, τόσο παρατηρησικά όσο και θεωρητικά δεδομένα καταδεικνύουν ότι οι άνεμοι των QSOs δεν είναι συνεχείς, ομαλοί και ομοιογενείς αλλά στο εσωτερικό τους αναπτύσσονται πυκνώματα τα οποία είναι υπεύθυνα για τα πολυσύνθετα και μεγάλης ποικιλομορφίας BAL προφίλ. Για τους λόγους αυτούς, προκείμενου να μελετηθούν οι BALs στο σύνολό τους, ανεξάρτητα από τον τύπο προφίλ που εμφανίζουν (ομαλό ή μη ομαλό), κρίνεται αναγκαία η χρήση ενός μοντέλου το οποίο να ενσωματώνει μια σειρά χαρακτηριστικών που να επιτρέπουν τη μελέτη των BALs ως σύνθεση πολλαπλών συνιστωσών προερχόμενων από νέφη απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης. Έτσι, στην εν λόγω μελέτη επιλέγεται το μοντέλο GR (Danezis et al. 2003, 2007, Lyratzi et al. 2007) το οποίο πληροί τις ανωτέρω προϋποθέσεις (βλέπε §4.3). Σε αυτό το πλαίσιο, τα ερωτήματα που προκύπτουν είναι: α) ποιος είναι ο ακριβής αριθμός των συνιστωσών από τις οποίες αποτελείται μια BAL κοιλάδα απορρόφησης, β) ποιο είναι το φυσικό μοντέλο των νεφών που δημιουργούν αυτές τις συνιστώσες και γ) ποιος είναι ο μηχανισμός σχηματισμού των BALs.

4.2. Το φυσικό μοντέλο της BAL περιοχής

Η θερμοκρασία του πλάσματος στην BAL περιοχή κυμαίνεται μεταξύ $10^4 - 10^5$ K. Στην περίπτωση του Si IV το θερμικό εύρος για θερμοκρασία 10^4 K είναι FWHM~4 km/s και FWHM~12 km/s για θερμοκρασία 10^5 K. Στην περίπτωση του C IV για θερμοκρασία 10^4 K είναι FWHM~6 km/s ενώ για θερμοκρασία 10^5 K είναι FWHM~20 km/s. Συνεπώς, τα θερμικά εύρη των Si IV και C IV είναι εξαιρετικά μικρά συγκρινόμενα με το εύρος μιας τυπικής BAL το οποίο είναι της τάξης των 10000 km/s. Αν υποθέσουμε ότι στη διεύρυνση των συνιστωσών απορρόφησης μιας BAL συνεισφέρει και η μικροτυρβώδης ροή (microturbulence) τότε το εύρος της γραμμής μπορεί να μεγαλώσει καθώς οι ταχύτητες της τυρβώδους ροής κυμαίνονται μεταξύ μερικών δεκάδων έως

μερικών εκατοντάδων km/s. Σε μια σειρά από εργασίες οι Bottorff et al. (2000) και Bottorff & Ferland (2000, 2002) πρότειναν ότι τα εύρη των γραμμών που παράγονται από τα BEL νέφη είναι μεγαλύτερα από τα θερμικά εύρη εξαιτίας της επίδρασης της μικρο-τυρβώδους ροής. Έδειξαν επίσης, ότι το πεδίο ταχυτήτων της μικρο-τυρβώδους ροής μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 200 km/s και 10³ km/s και ότι η τελευταία τιμή δεν παραβιάζει τις παρατηρήσεις. Επίσης, οι Bottorff & Ferland (2001) πρότειναν ότι τα νέφη της BEL περιοχής αποτελούν σμήνη από αλληλεπικαλυπτόμενα πυκνώματα. Οι Sako et al. (2001) μελετώντας το φάσμα ακτίνων X του quasar IRAS 13349+2438, παρατήρησαν γραμμές απορρόφησης από ιόντα όπως C V, C VI, O VII, O VIII, Fe VII-XII, με εύρη της τάξης των 1400 km/s. Αποδίδουν τα εύρη αυτά σε υπέρθεση πολλαπλών διακριτών συνιστωσών κάθε μία από τις οποίες είναι οπτικά λεπτή. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι τέτοια χαρακτηριστικά απορρόφησης έχουν παρατηρηθεί στις UV γραμμές απορρόφησης πολλών γαλαξιών Seyfert (Crenshaw et al. 1999, και αναφορές εντός) κάποιες από τις οποίες αποτελούνται από 7 συνιστώσες απορρόφησης (Mrk 509; Kriss et al. 2000). Τέλος, οι Lyratzi et al. (2008, 2009, 2010a, b, c, 2011) χρησιμοποιώντας το μοντέλο των Danezis et al. (2003, 2007); Lyratzi et al. (2007) έδειξαν ότι, σε συγκεκριμένους quasars, οι BALs Lyα και C IV αποτελούν σύνθεση επιμέρους συνιστωσών οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά στο χώρο των ταχυτήτων.

Βασιζόμενοι στις προηγούμενες μελέτες οι Stathopoulos et al. (2015, 2019) πρότειναν ένα φυσικό μοντέλο για την BAL περιοχή και έναν μηχανισμό για τον σχηματισμό των BALs Si IV και C IV. Σύμφωνα με το φυσικό μοντέλο οι BALs αποτελούν σύνθεση επιμέρους συνιστωσών απορρόφησης, οι οποίες δημιουργούνται σε συμπυκνώσεις πλάσματος, σχηματιζόμενων εντός της εκροής, τις οποίες καλούν νέφη. Σημειώνεται ότι ο όρος «νέφος» είναι περιγραφικός κάποιου είδους σχηματισμού-δομής (πύκνωμα πλάσματος) σχηματιζόμενης εντός τη εκροής και ότι τα νέφη δεν είναι προϋπάρχουσες δομές πλάσματος που επιταχύνονται από την πίεση της ακτινοβολίας.

Οι συνιστώσες που χρησιμοποιούνται, στην εν λόγω μελέτη, για την ανάλυση των BALs Si IV και C IV, προέρχονται από νέφη πλάσματος και έχουν εύρη μεγαλύτερα από το θερμικό εύρος και το εύρος λόγω μικρό-τυρβώδους ροής. Στην περίπτωση του Si IV τα εύρη των συνιστωσών βρίσκονται μεταξύ 270 (km/s) \leq FWHM_{SiIV} \leq 2020 (km/s) ενώ στην περίπτωση του C IV μεταξύ 280 (km/s) \leq FWHM_{CIV} \leq 2730 (km/s). Όπως είναι εμφανές, ακόμη και αν ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της μικρο-τυρβώδους ροής, τα εύρη των συνιστωσών, που οφείλονται σε νέφη απορρόφησης, εξακολουθούν να είναι ιδιαίτερα μεγάλα. Προκειμένου να ερμηνευθεί αυτή η ασυνέπεια προτάθηκε (Stathopoulos et al. 2015, 2019) ότι τα αποκαλούμενα νέφη είναι σμήνη από μικρότερες υπομονάδες οι οποίες καλούνται στοιχεία του νέφους (cloud elements) ή μικρά νέφη (cloudlets) ή clumps. Προς αποφυγή οποιασδήποτε παρερμηνείας, από το σημείο αυτό και στο εξής, θα αναφερόμαστε στις μεγάλες και πιο προεξέχουσες δομές ως νέφη (Περιοχές Ι, εικόνα 4.1) ενώ στις μικρότερες υποδομές ως «clumps» (Περιοχές ΙΙ, εικόνα 4.1).

Οι Stathopoulos et al. (2015, 2019) πρότειναν επίσης ότι στην περίπτωση quasars οι οποίοι φέρουν BALs Si IV και C IV στις ίδιες ταχύτητες, και οι δύο BALs δημιουργούνται στα ίδια νέφη τα οποία χαρακτηρίζονται από παρόμοιες αποστάσεις, από την μελανή οπή, παρόμοια κινηματική δομή και φυσικές συνθήκες. Έτσι, οι BALs Si IV και C IV αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών απορρόφησης.

Ο προτεινόμενος μηχανισμός σχηματισμού των BALs είναι ο εξής (Stathopoulos et al. 2015, 2019): Κάθε clump παράγει μία γραμμή απορρόφησης, το εύρος της οποίας

εξαρτάται από τις θερμικές και μη θερμικές (microturbulent) κινήσεις των ιόντων εκάστου clump. Η σύνθεση όλων αυτών των στενών γραμμών απορρόφησης (που παράγονται από τα clumps), οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά στον χώρο των ταχυτήτων, με αποτέλεσμα να αλληλεπικαλύπτονται, παράγει τις σχετικά πλατιές (ευρύτερες από το θερμικό εύρος συν το εύρος λόγω microturbulence) συνιστώσες που αντιστοιχούν στα νέφη. Η σύνθεση των πλατιών συνιστωσών, που οφείλονται σε νέφη, δημιουργεί τα πλατιά αυλάκια απορρόφησης που καλούνται BALs (Stathopoulos et al. 2015).



Εικόνα 4.1. Γραφική απεικόνιση των νεφών (clouds-I) και των στοιχείων εκάστου νέφους (clumps-II), (Stathopoulos et al. 2015).

Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία μελετώνται μέσω του μοντέλου GR και του λογισμικού ASTA (βλέπε § 4.4), οι πλατιές συνιστώσες απορρόφησης που οφείλονται σε νέφη και όχι η φυσική των clumps. Δηλαδή, οι πλατιές κοιλάδες απορρόφησης (BALs), όπως προαναφέρθηκε, αναλύονται στις συνιστώσες η προέλευση των οποίων είναι τα νέφη (Περιοχές Ι, εικόνα 4.1), συνεπώς μελετώνται οι γραμμές απορρόφησης των νεφών και όλες οι φυσικές παράμετροι που υπολογίζονται αφορούν τα νέφη.

4.3. Το μαθηματικό μοντέλο GR

Αρχικά θα πρέπει να καταστεί σαφής ο διαχωρισμός μεταξύ θεωρητικής μοντελοποίησης και μεθόδων καλύτερης προσαρμογής (best fitting) των φασματικών γραμμών (BALs ή DACs π.χ Si IV και CIV).

Στο πλαίσιο της θεωρητικής μοντελοποίησης (Wampler et al. 1993) εισάγονται θεωρητικές τιμές φυσικών παραμέτρων (π.χ. ενέργειες ιονισμού, πυκνότητες στήλης, σχετικές ιοντικές αφθονίες, oscillator strengths, εργαστηριακά μήκη κύματος, θερμικά εύρη γραμμών, γωνία παρατήρησης, κ.τ.λ.) σε ένα μοντέλο και κατόπιν αυτόματα, χωρίς την άμεση συμμετοχή του ερευνητή, υπολογίζονται θεωρητικά προφίλ (π.χ BAL ή DAC) γραμμών τα οποία συγκρίνονται με τα παρατηρούμενα.

Σε αντίθεση, στην περίπτωση της μεθόδου του "best fitting" επιχειρείται προσπάθεια προσαρμογής ενός φασματικού προφίλ, μέσω παρεμβολής μιας συνάρτησης, στα σημεία του φάσματος, η οποία πρέπει να έχει προκύψει από την λύση της εξίσωσης διάδοσης ακτινοβολίας διά μέσου μια πολύπλοκης ατμόσφαιρας επάλληλων πυκνωμάτων πλάσματος (περίπτωση DACs), ή νεφών στην περίπτωση των BALs, BELs.

Κατά την διαδικασία της καλύτερης προσαρμογής, η εισαγωγή των αρχικών τιμών των παραμέτρων γίνεται από τον χρήστη. Η αναγκαιότητα αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι πρέπει να επιταχυνθεί η διαδικασία προσαρμογής αποκλειομένου ενός τεράστιου αριθμού τιμών των παραμέτρων οι οποίες δεν είναι σωστές εφόσον δεν πληρούν μια μεγάλη σειρά περιορισμών - κριτηρίων. Η εισαγωγή αυτών των κριτηρίων δίνει την δυνατότητα να υπολογιστούν μονοσήμαντα τόσο ο ακριβής αριθμός των συνιστωσών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, όσο και οι τιμές των μετρούμενων φυσικών παραμέτρων (Stathopoulos et al. 2015, βλέπε § 4.3.4). Η εισαγωγή αυτών των κριτηρίων τα οποία εξασφαλίζου το μονοσήμαντο της λύσης αποτελούσε το μεγάλο ερώτημα σε διεθνές επίπεδο προκειμένου να γίνει αποδεκτή η χρησιμοποιούμενη μέθοδος.

Για κάθε εισαγωγή από τον χρήστη μιας ομάδας παραμέτρων ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία και γίνεται έλεγχος της προσαρμογής μέσω ελαχιστοποιημένου χ^2 ($\chi^2_{reduced}$: βλέπε § 4.3.3) μέχρι να επιτευχθεί η καλύτερη προσαρμογή της συνάρτησης στα σημεία του φάσματος που συνιστούν μια φασματική γραμμή. Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή προσαρμογή (best fit) είναι αυτές που επικρατούν στην περιοχή δημιουργίας των φασματικών γραμμών (DACs και BALs/BELs).

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση της δεύτερης μεθόδου (μοντέλο best fitting ή GR model βλέπε § 4.3.1) η οποία είναι και η μόνη η οποία έχει την δυνατότητα υπολογισμού των παραμέτρων των φασματικών συνιστωσών εκπομπής ή απορρόφησης. Ειδικότερα: Τα δεδομένα ενός προς επεξεργασία φάσματος (δεδομένα δορυφόρου), παρουσιάζονται γραφικά ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών (λ_i , F(λ_i) όπου λ_i το μήκος κύματος (σε Å) με αμελητέα αβεβαιότητα και F(λ_i) η ροή της ακτινοβολίας (σε erg s⁻¹ cm⁻²Å⁻¹), με αβεβαιότητα σ_i. Το πρόβλημα της καλύτερης προσαρμογής μιας φασματικής γραμμής εμπίπτει στο πεδίο της αριθμητικής ανάλυσης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την καλύτερη προσαρμογή μιας φασματικής γραμμής, δηλαδή ενός συνόλου σημείων είναι η παρεμβολή (curve fitting: Kolb, 1984, Arlinghaus, 1994). Παρεμβολή σε ένα σύνολο σημείων, όπως στην περίπτωση μιας φασματικής γραμμής, είναι η διαδικασία κατά την οποία αναζητείται μία καμπύλη η οποία προέρχεται από μία μαθηματική συνάρτηση η οποία να περνά διαμέσου των σημείων και να έχει την ελάχιστη δυνατή απόκλιση από αυτά, δηλαδή να παρέχει την καλύτερη προσαρμογή (best fit).

Στην ιδανική περίπτωση η καμπύλη ή η μαθηματική συνάρτηση θα πρέπει να αναπαράγει επακριβώς τα σημεία. Η μέθοδος κατά την οποία ελέγχεται η ποιότητα της προσομοίωσης, δηλαδή το πόσο καλά το μοντέλο περιγράφει τα δεδομένα, καλείται «έλεγχος καλής προσαρμογής-goodness of fit test». Από τους πλέον γνωστούς, ευρέως

χρησιμοποιούμενους και αξιόπιστους είναι ο έλεγχος ελαχιστοποιημένου χ^2 ($\chi^2_{reduced}$ test).

4.3.1. Η συνάρτηση παρεμβολής

Οι Danezis et al. (2003) έλυσαν την εξίσωση διάδοσης ακτινοβολίας για ένα αστροφυσικό περιβάλλον το οποίο περιλαμβάνει την πηγή της συνεχούς ακτινοβολίας στην γραμμή παρατήρησης της οποίας εδράζονται πυκνώματα απορρόφησης ή/και εκπομπής. Μέσω της επίλυσης κατέληξαν στο πολυώνυμο παρεμβολής το οποίο προσεγγίζοντας τα σημεία του φάσματος μπορεί να δώσει την καλύτερη δυνατή προσαρμογή μιας σύνθετης φασματικής γραμμής αποτελούμενης από επιμέρους συνιστώσες. Οι συνιστώσες από τις οποίες αποτελείται η σύνθετη φασματική γραμμή δημιουργούνται στα πυκνώματα απορρόφησης ή/και εκπομπής στην γραμμή επίρησης. Η τελική συνάρτηση παρεμβολής που προκύπτει από την επίλυσης της εξίσωσης διάδοσης της ακτινοβολίας, είναι:

$$F(\lambda)_{\text{final}} = \left[F_0(\lambda)\prod_i \exp\{-L_i\xi_i\} + \sum_j S_{\lambda_{ej}}(1 - \exp\{-L_{ej}\xi_{ej}\})\right]\prod_g \exp\{-L_g\xi_g\}$$
(4.1)

όπου

- i: είναι ο αριθμός των νεφών απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης,
- j: είναι ο αριθμός των νεφών εκπομπής στη γραμμή παρατήρησης,
- g: είναι ο αριθμός επιπλέον νεφών απορρόφησης που μπορεί να καλύπτουν τα i νέφη απορρόφησης και τα j νέφη εκπομπής στη γραμμή παρατήρησης.
- F_{λ0}: είναι η αρχική ροή της ακτινοβολίας που περνά μέσα από τα νέφη εκπομπής και απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης.
- exp{-L_iξ_i}: είναι η συνάρτηση γραμμής που περιγράφει μια συνιστώσα απορρόφησης η οποία σχηματίζεται σε ένα νέφος απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης και συνεισφέρει στο σχηματισμό μιας BAL.
- $\prod_i \exp\{-L_i\xi_i\}$: είναι ο παράγοντας που περιγράφει τη σύνθεση των συνιστωσών απορρόφησης (ως γινόμενο συναρτήσεων) που οφείλονται σε i νέφη στη γραμμή παρατήρησης. Ο παράγοντας αυτός αποτελεί το πολυώνυμο παρεμβολής που μπορεί να προσομοιώσει μια BAL.
- $S_{\lambda_{ej}}(1 \exp\{-L_{ej}\xi_{ej}\})$: είναι η συνάρτηση γραμμής που περιγράφει μία συνιστώσα εκπομπής η οποία σχηματίζεται σε ένα νέφος εκπομπής στη γραμμή παρατήρησης,
- $\sum_{j} S_{\lambda_{ej}} (1 \exp\{-L_{ej}\xi_{ej}\})$: είναι ο παράγοντας που περιγράφει τη σύνθεση (ως άθροισμα συναρτήσεων) των συνιστωσών εκπομπής που οφείλονται σε j νέφη εκπομπής στη γραμμή παρατήρησης. Ο παράγοντας αυτός αποτελεί το πολυώνυμο παρεμβολής που μπορεί να προσομοιώσει μια BEL.
- $\prod_g \exp\{-L_g\xi_g\}$: είναι παράγοντας που περιγράφει τη σύνθεση των συνιστωσών απορρόφησης που οφείλονται σε g νέφη απορρόφησης τα οποία εν δυνάμει

καλύπτουν τόσο τα i νέφη απορρόφησης όσο και τα j νέφη εκπομπής στην γραμμή παρατήρησης.

- L_i, L_g: είναι οι συναρτήσεις κατανομής των συντελεστών απορρόφησης k_{λi}, k_{λej}, k_{λg}, αντίστοιχα,
- k_{λi}: ο συντελεστής απορρόφησης του i νέφους απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης,
- k_{λej}: ο συντελεστής απορρόφησης του j νέφους εκπομπής στη γραμμή παρατήρησης,
- k_{λg}: ο συντελεστής απορρόφησης των επιπρόσθετων νεφών απορρόφησης που μπορεί να καλύπτουν τα i νέφη απορρόφησης και j νέφη εκπομπής, στη γραμμή παρατήρησης,
- ξ: το οπτικό βάθος στο κέντρο μιας φασματικής γραμμής,
- S_{λej}: είναι η συνάρτηση πηγής η οποία είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της παρατήρησης.

Η Εξίσωση (4.1) αποτελεί την τελική συνάρτηση η οποία παρεμβαλλόμενη, μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, στα σημεία του φάσματος, μπορεί να δώσει την καλύτερη δυνατή προσομοίωση μιας σύνθετης φασματικής γραμμής αποτελούμενης από επιμέρους συνιστώσες. Στην περίπτωση γραμμών συντονισμού, όπως αυτές των ιόντων Si IV και C IV, γίνεται χρήση της Εξ. (4.1) ανεξάρτητα για κάθε μέλος της διπλέτας συντονισμού. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του C IV εφαρμόζεται η εξίσωση (4.1) δύο φορές, μία φορά για τη σύνθεση όλων των «μπλε» (1548.187 Å) συνιστωσών και μία φορά για τη σύνθεση όλων των «κόκκινων» (1550.772 Å) συνιστωσών. Εφαρμόζοντας την εξίσωση (4.1) δύο φορές καταλήγουμε με δύο σετ γραμμών. Το πρώτο σετ περιλαμβάνει τη σύνθεση όλων των «κόκκινων» συνιστωσών του C IV ενώ το δεύτερο σετ περιλαμβάνει τη σύνθεση όλων των «κόκκινων» συνιστωσών. Η σύνθεση των δύο σετ γραμμών παρέχει το συνολικό προφίλ της μιας σύνθετης γραμμή εκπομπής ή απορρόφησης.



Εικόνα 4.2. Σχηματική αναπαράσταση της περίπτωσης κατά την οποία στη γραμμή παρατήρησης απαντώνται μόνο νέφη απορρόφησης και ο τρόπος σύνθεσης των επιμέρους συνιστωσών απορρόφησης που συνιστούν το προφίλ μιας BAL. Η σκιασμένη γκρι περιοχή αναπαριστά το δίσκο προσαύξησης, που περιβάλει τη μελανή οπή (μαύρο χρώμα), και αποτελεί την πηγή του συνεχούς έντασης I₀. Στη γραμμή παρατήρησης εμφανίζονται τα νέφη απορρόφησης ως σμήνη μικρότερων δομών τα οποία αποκαλούνται cloudlets.

Όπως είναι εμφανές από την Εξ. (4.1), το προφίλ μιας σύνθετης γραμμής απορρόφησης (αποτελούμενη από συνιστώσες) προκύπτει ως γινόμενο (και όχι ως άθροισμα-convolution) συναρτήσεων κάθε μία από τις οποίες περιγράφει και μία συνιστώσα απορρόφησης. Οι επιμέρους συνιστώσες απορρόφησης δημιουργούνται σε νέφη απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης. Στην Εικόνα 4.2. αναπαριστάται σχηματικά η περίπτωση κατά την οποία στη γραμμή παρατήρησης απαντώνται μόνο νέφη απορρόφησης και ο τρόπος σύνθεσης των επιμέρους συνιστωσών απορρόφησης που συνιστούν το προφίλ μιας BAL.

4.3.2. Οι κατανομές που ενσωματώνει το μοντέλο

Οι Danezis et al. (2003, 2007), Lyratzi et al. (2007) παραμετροποίησαν το προφίλ του οπτικού βάθους (τ ≡ Lξ) μέσω των κατανομών Lorentz, Gauss, Voigt, Rotation και Gauss-Rotation (Danezis et al. 2007, Lyratzi et al. 2007). Επίσης, έδειξαν ότι όταν, για παράδειγμα, το προφίλ του οπτικού βάθους (η εξάρτηση του οπτικού βάθους από το μήκος κύματος) ακολουθεί κατανομή Gauss, τότε το προφίλ μιας γραμμής απορρόφησης [exp($-L_i$ ξ_i)] ή εκπομπής [S_{λej}(1 − exp($-L_e$ ξ_{ej}))] ακολουθεί και αυτό την κατανομή Gauss. Το ίδιο ισχύει και για τις υπόλοιπες προαναφερθείσες κατανομές. Ο παράγοντας L_i εκφράζει το είδος της κατανομής το οποίο περιγράφει το προφίλ των συνιστωσών φασματικών γραμμών των DACs και BELs/BALs.

Στην περίπτωση κλασικών φασματικών γραμμών, η καλύτερη προσαρμογή (best fit) πραγματοποιείται με την παρεμβολή γνωστών κατανομών, ανάλογα με τις φυσικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή που παράγει τις γραμμές, στο σύνολο των σημείων που συνιστούν τη φασματική γραμμή. Έτσι, στην περίπτωση που στην περιοχή που δημιουργείται η φασματική γραμμή, επικρατεί η πίεση, η ιδανική παρεμβολή γίνεται μέσω της κατανομής Lorentz. Στην περίπτωση που στην περιοχή επικρατούν οι τυχαίες κινήσεις των ιόντων (θερμικές και μη θερμικές-microturbulence) την καλύτερη δυνατή προσομοίωση δίνει η κατανομή Gauss. Αν στην περιοχή επικρατεί τόσο η πίεση όσο και οι τυχαίες κινήσεις των ιόντων (θερμικές και μη θερμικέςmicroturbulence) η καλύτερη προσομοίωση επιτυγχάνεται με χρήση της κατανομής Voigt. Αν η περιοχή δημιουργίας μιας φασματικής γραμμής ιδιοπεριστρέφεται και η συνεισφορά της ιδοπεριστροφής είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συνεισφορά άλλων παραγόντων (πίεση ή/και τυχαίες κινήσεις των ιόντων) ώστε οι άλλοι παράγοντες να μην συνεισφέρουν ουσιαστικά στην διεύρυνση μιας φασματικής γραμμής, τότε η ιδανική προσομοίωση γίνεται μέσω μιας νέας κατανομής, της κατανομής Rotation (Danezis et al., 2003). Στην περίπτωση που το εύρος της φασματικής γραμμής καθορίζεται τόσο από την ιδιοπεριστροφή της περιοχής όσο και από τις τυχαίες κινήσεις των ιόντων της περιοχής, τότε η καλύτερη προσομοίωση επιτυγχάνεται μέσω μιας νέας κατανομής, της κατανομής Gauss-Rotation (Danezis et al. 2007, Lyratzi et al. 2007).

Σημειώνεται ότι το πρόβλημα της παρεμβολής στην περίπτωση των φασματικών γραμμών, δεν είναι ένα καθαρά μαθηματικό πρόβλημα, καθώς οι παράμετροι που συνεισφέρουν στην δημιουργία μιας φασματικής γραμμής έχουν φυσικό περιεχόμενο. Έτσι, η κατανομή της οποίας θα γίνεται χρήση θα πρέπει να είναι εκπεφρασμένη μέσω φυσικών και όχι μαθηματικών παραμέτρων (Danezis et al. 2003, 2007, Lyratzi et al. 2007). Στα πλαίσια του μοντέλου GR, οι προαναφερθείσες κατανομές έχουν την εξής μορφή:

<u>Κατανομή Gauss</u>

Στην περίπτωση που στην περιοχή που δημιουργείται η φασματική γραμμή, επικρατούν οι θερμικές και μη θερμικές (microturbulence²⁰) κινήσεις των ιόντων οι παράγοντες L_i, L_{ej}, L_gπαίρνουν τη μορφή:

$$L_{Gauss} = \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right]$$
(4.2)

όπου

σ: η τυπική απόκλιση της Gauss

λ₀: το μήκος κύματος στο κέντρο της παρατηρούμενης φασματικής γραμμής λ: το μήκος κύματος σε κάθε σημείο ενός φασματικού προφίλ

<u>Κατανομή Lorentz</u>

Στην περίπτωση που στην περιοχή που δημιουργείται η φασματική γραμμή επικρατεί η πίεση, οι παράγοντες L_i , L_g , L_g παίρνουν τη μορφή:

$$L_{\text{Lorentz}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\gamma}\right)^2}$$
(4.3)

όπου

γ: scale parameter (καθορίζει το εύρος της φασματικής γραμμής) λ₀: το μήκος κύματος στο κέντρο της παρατηρούμενης φασματικής γραμμής λ: το μήκος κύματος σε κάθε σημείο ενός φασματικού προφίλ

<u>Κατανομή Voigt</u>

Στην περίπτωση που στην περιοχή που δημιουργείται η φασματική γραμμή επικρατούν οι θερμικές και μη θερμικές κινήσεις των ιόντων και η πίεση, οι παράγοντες L_i, L_{ej}, L_g παίρνουν τη μορφή:

$$L_{\text{Voigt}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\frac{(\lambda' - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}}{1 + \frac{(\lambda - \lambda')^2}{\gamma^2}} d\lambda'$$
(4.4)

²⁰ Ένας επιπλέον παράγοντας διεύρυνσης μιας φασματικής γραμμής είναι η τυρβώδης ροή μικρής κλίμακας (micoroturbulence broadening: Hundt, 1973, A&A, 29, 17). Ο εν λόγω μηχανισμός περιλαμβάνει εσωτερικές κινήσεις σε ένα νέφος εκπομπής ή απορρόφησης οι οποίες έχουν μη θερμική προέλευση (convection: ρεύματα μεταφοράς ρευστού από ένα σημείο σε ένα άλλο λόγω της μέσης μεταφορικής κίνησής του) και δρουν σε κλίμακες μήκους μικρότερες από την μέση ελεύθερη διαδρομή ενός φωτονίου (οπτικό βάθος ίσο με μονάδα). Στην περίπτωση της τυρβώδους ροής μικρής κλίμακας ταχύτητες παράγουν μετατοπίσεις Doppler οι οποίες είναι εντελώς ανάλογες με αυτές που οφείλονται στις θερμικές κινήσεις (Gray 2008). Η συνολική διεύρυνση ρπροκύπτει από την σύνθεση των δύο κατανομών Gauss με εύρος Doppler $u_D^2 = u_{turb}^2 + u_{th}^2$, όπου $u_{th} = \sqrt{2kT/m}$.

γ: scale parameter (καθορίζει το εύρος της φασματικής γραμμής) λ₀: το μήκος κύματος στο κέντρο της παρατηρούμενης φασματικής γραμμής λ: το μήκος κύματος σε κάθε σημείο ενός φασματικού προφίλ

<u>Κατανομή Rotation</u>

Στην περίπτωση που το εύρος του προφίλ μιας φασματικής γραμμής καθορίζεται από την ιδιοπεριστροφή της περιοχής που παράγεται η γραμμή τότε οι παράγοντες L_i, L_{ej}, L_g παίρνουν τη μορφή (Danezis et al. 2003):

$$L_{\text{Rotation}}(\lambda) = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_0}, \, \alpha \nu \cos \theta_0 = \frac{-\lambda_0 + \sqrt{\lambda_0^2 + 4\Delta \lambda_{\text{rot}}^2}}{2\Delta \lambda_{\text{rot}} \cdot z_0} < 1$$
(4.5)

και

$$L_{\text{Rotation}}(\lambda) = 0, \alpha \nu \cos \theta_0 = \frac{-\lambda_0 + \sqrt{\lambda_0^2 + 4\Delta \lambda_{\text{rot}}^2}}{2\Delta \lambda_{\text{rot}} \cdot z_0} \ge 1$$
(4.6)

όπου

λ: το μήκος κύματος σε κάθε σημείο ενός φασματικού προφίλ $\Delta \lambda_{rot}$: η διεύρυνση της γραμμής λόγω ιδιοπεριστροφής του νέφους $z_0 = \Delta \lambda_{rot} / \lambda_{lab} = V_{rot} / c$ V_{rot} : η ταχύτητα περιστροφής του νέφους περί του άξονά του $\Delta \lambda_{rot}$: το εύρος της φασματικής γραμμής $-\pi/2 \le \theta_0 \le \pi/2$

<u>Κατανομή Gauss-Rotation</u>

Στην περίπτωση που στη διεύρυνση της γραμμής συνεισφέρουν τόσο οι θερμικές και μη θερμικές κινήσεις των ιόντων αλλά και η ιδιοπεριστροφή της περιοχής που παράγει τις γραμμές, θα πρέπει να γίνει η σύνθεση της κατανομής Gauss με την κατανομή Rotation. Η σύνθεση των δύο κατανομών δίνει την κατανομή Gauss-Rotation (Danezis et al. 2007) η οποία περιγράφει τη συνδυασμένη συνεισφορά των δύο παραγόντων διεύρυνσης μιας φασματικής γραμμής:

$$L_{GR}(\lambda) = \frac{\sqrt{\pi}}{2\lambda_0 z} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \left[erf\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma\sqrt{2}} + \frac{\lambda_0 z}{\sigma\sqrt{2}}\cos\theta\right) - erf\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma\sqrt{2}} - \frac{\lambda_0 z}{\sigma\sqrt{2}}\cos\theta\right) \right] \cos\theta d\theta \qquad (4.7)$$

όπου

λ: το μήκος κύματος σε κάθε σημείο ενός φασματικού προφίλ $\lambda_0 = \lambda_{lab} \pm \Delta \lambda_{rad}$ λ_0 : το μήκος κύματος στο κέντρο της παρατηρούμενης φασματικής γραμμής λ_{lab} : το εργαστηριακό μήκος κύματος της φασματικής γραμμής $\Delta \lambda_{rad}$: η ακτινική μετατόπιση του κέντρου της φασματικής γραμμής erf(x): error function²¹ $z = V_{rot}/c$

4.3.3. Το ελαχιστοποιημένο χ^2

Στην περίπτωση της προσομοίωσης ενός φάσματος το χ^2 ορίζεται ως εξής: Έστω ότι επιθυμούμε να προσομοιώσουμε το προφίλ μιας φασματικής γραμμής, αποτελούμενο από Ν σημεία (λ_i , F(λ_i)) με αβεβαιότητα σ_i, μέσω μιας μη γραμμικής συνάρτησης η οποία χαρακτηρίζεται από ν παραμέτρους φ(λ ; α_1 , α_2 , ... α_v). Ο έλεγχος του κατά πόσο καλά η συνάρτησης φ(λ ; α_1 , α_2 , ... α_v) προσομοιώνει τα παρατηρησιακά δεδομένα γίνεται μέσω της σχέσης (Bevington 1969):

$$\chi_{\text{red}}^2 = \frac{\chi^2}{d} = \sum_{1}^{N} \left(\frac{F(\lambda_i) - \varphi(\lambda_i)}{\sigma_i} \right)^2$$
(4.8)

όπου

d = N - v είναι οι βαθμοί ελευθερίας που ισούνται με τον αριθμό των παρατηρούμενων σημείων (N) μείον τον αριθμό των ελεύθερων παραμέτρων (v) που χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση.

Στην περίπτωση που η αβεβαιότητα σ_i είναι γνωστή εκ των προτέρων, τότε τιμή $\chi^2_{reduced} \gg 1$ καταδεικνύει κακή προσομοίωση των παρατηρούμενων δεδομένων από το μοντέλο. Τιμή $\chi^2_{reduced} = 1$ σημαίνει ιδανική προσομοίωση των δεδομένων από το μοντέλο (Bevington 1969), ενώ όταν ο έλεγχος δίνει $\chi^2_{reduced} < 1$ θεωρείται ότι το μοντέλο «υπέρ-προσομοιώνειι» (over-fitting) τα δεδομένα που σημαίνει ότι είτε το μοντέλο προσομοιώνει τον θόρυβο είτε ότι το σφάλμα σ_i έχει υπερεκτιμηθεί. Τέλος σημειώνεται ότι οι αποδεκτές τιμές του $\chi^2_{reduced}$ οι οποίες καταδεικνύουν την ικανοποιητική προσομοίωση εξαρτώνται από το υπό μελέτη πρόβλημα. Στην περίπτωση των BALQSOs στους οποίους απαιτείται προσομοίωση μέσω πολλαπλών συνιστωσών, μια προσομοίωση θεωρείται αποδεκτή όταν $\chi^2_{reduced} \le 2$ (Laor et al. 1994).

4.3.4. Κριτήρια προσομοίωσης των BALs Si IV και C IV

Όπως είναι φανερό από τα προηγούμενα το ζητούμενο είναι η μελέτη των επιμέρους νεφών τα οποία δημιουργούν τις συνιστώσες από τις οποίες αποτελούνται οι BALs και όχι η αντιμετώπιση των BALs ως ενιαίων φασματικών γραμμών. Η προσπάθεια ανάλυσης των προφίλ των BALs γραμμών συντονισμού, σε επιμέρους συνιστώσες αναδεικνύει μια σειρά σημαντικών προβλημάτων:

²¹ Η συνάρτηση erf(x) καλείται συνάρτηση σφάλματος και ορίζεται ως $erf(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-x}^{x} e^{-t^2} dt$

- Η εύρεση της τελικής συνάρτησης η οποία παρέχει την καλύτερη δυνατή προσομοίωση του συνόλου των σημείων του φάσματος που συνιστούν την BAL.
- Η τελική συνάρτηση γραμμής θα πρέπει να προκύπτει από τη σύνθεση των επιμέρους συναρτήσεων κάθε μία από τις οποίες περιγράφει μια φασματική συνιστώσα της BAL προερχόμενη από ένα νέφος απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης.
- Οι γραμμές των ιόντων Si IV και C IV είναι διπλέτες συντονισμού γεγονός το οποίο • δυσχεραίνει σε πολύ μεγάλο βαθμό την προσομοίωση των πλατιών προφίλ των BALs. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι το κάθε νέφος απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης δεν παράγει μια μονήρη γραμμή απορρόφησης αλλά μια διπλέτα συντονισμού με αποτέλεσμα να γίνεται μεγαλύτερος τόσο ο αριθμός των συνιστωσών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση των BALs όσο και ο αριθμός των ελεύθερων παραμέτρων κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης. Επιπροσθέτως, οι δύο συνιστώσες μιας διπλέτας συντονισμού, βρίσκονται αρκετά κοντά μεταξύ τους στο χώρο των ταχυτήτων (στον C IV η διαφορά ταχυτήτων είναι 500 km/s και στο Si IV είναι 1930 km/s) με αποτέλεσμα να είναι εξαιρετικά δύσκολο να διακριθούν μεταξύ τους. Στο σημείο αυτό κρίνεται αναγκαίο να σημειωθεί ότι, εξαιτίας των ανωτέρω δυσκολιών, στη συντριπτική πλειοψηφία των μελετών οι διπλέτες συντονισμού αντιμετωπίζονται ως μια μονήρη φασματική γραμμή. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του C IV αυτός δεν αντιμετωπίζεται ως μια διπλέτα συντονισμού (λλ 1548.187, 1550.772 Å) αλλά ως μια μονή γραμμή στα 1549 Å (βλέπε π.χ. Laor et al. 1994, Marziani et al. 1996, 2010, Sulentic et al. 2007, 2017, Negrete et al. 2012, 2014). Ομοίως, η διπλέτα του Si IV (λλ 1939.755, 1402.77 Å) αντιμετωπίζεται ως μία γραμμή στα 1397 Å (βλέπε Negrete et al. 2012, 2014). Στην περίπτωση των διπλετών των γραμμών συντονισμού, (π.χ. Si IV λλ 1393.755, 1402.77 Å) η μελέτη των, δύο ανεξάρτητων μεταξύ τους, φασματικών γραμμών της διπλέτας συντονισμού ως ενιαίο σύνολο μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα μέσω μεγάλων αποκλίσεων των τιμών των μετρούμενων παραμέτρων. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στην περίπτωση του Si IV όπου η διαφορά μηκών κύματος μεταξύ της μπλε και της κόκκινης γραμμής συντονισμού είναι μεγάλη.
- Το τελευταίο, και ίσως πιο σημαντικό, πρόβλημα είναι η μοναδικότητα της τελικής προσομοίωσης. Σύμφωνα με τους Laor et al. (1994) το κυριότερο πρόβλημα μιας προσομοίωσης μέσω πολλαπλών συνιστωσών είναι ότι η τελική προσομοίωση δεν είναι μοναδική. Ειδικά στην περίπτωση των Si IV και C IV οι συνιστώσες των διπλετών, λόγο του μεγάλου εύρους τους (μεγαλύτερο από το θερμικό), είναι αναμεμιγμένες τόσο μεταξύ τους όσο και μεταξύ γειτονικών διπλετών. Αυτό σημαίνει ότι η τελική προσομοίωση θα είναι εκφυλισμένη εκτός και αν τα δύο ιόντα προσομοιωθούν συγχρόνως. Έτσι προκειμένου να βρεθεί η τελική προσομοίωση, η οποία θα είναι μοναδική και ανεξάρτητη από τις αρχικές τιμές των παραμέτρων προσομοίωσης, απαιτείται η ταυτόχρονη προσομοίωση των BALs Si IV και C IV θέτοντας αυστηρούς περιορισμούς μεταξύ των παραμέτρων προσομοίωσης.

Στην περίπτωση των μελετώμενων BALQSOs θεωρούμε ότι οι συνιστώσες των BELs, Si IV και C IV, ακολουθούν την κατανομή Voigt ενώ στην περίπτωση των BALs, οι συνιστώσες ακολουθούν την κατανομή Gauss. Σε αυτό το συμπέρασμα καταλήξαμε έπειτα από δοκιμές όλων των διαθέσιμων κατανομών (Lorentz, Gauss, Voigt, Rotation, Gauss-Rotation). Οι έλεγχοι έδειξαν ότι οι BELs Si IV και C IV προσομοιώνονται καλύτερα αν συνιστώσες του ακολουθούν την κατανομή Voigt ενώ οι BALs προσομοιώνονται καλύτερα αν οι συνιστώσες απορρόφησης ακολουθούν την κατανομή Gauss.

Έτσι, κατά την διαδικασία προσομοίωσης των BALs Si IV και C IV, απαιτούνται τρεις ελεύθερες παράμετροι για κάθε συνιστώσα απορρόφησης. Οι παράμετροι είναι η ακτινική ταχύτητα (V_{rad}), το οπτικό βάθος στο κέντρο της γραμμής τ₀ και η τυπική απόκλιση της Gauss (σ). Ως αποτέλεσμα, η προσομοίωση των BALs Si IV και C IV, μέσω πολλαπλών συνιστωσών, απαιτεί έναν μεγάλο αριθμό ελεύθερων παραμέτρων, όπως και προαναφέρθηκε. Έτσι, το πρόβλημα της προσομοίωσης των BALs Si IV και C IV είναι πολλαπλό.: (α) επίτευξη της καλύτερης δυνατής προσομοίωσης των BAL προφίλ, (β) η μοναδικότητα του αριθμού των συνιστωσών που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωσης και (γ) η μοναδικότητα των τιμών των φυσικών παραμέτρων των συνιστωσών που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωσης.

Όλα τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν, οδήγησαν στη διατύπωση μιας σειράς κριτηρίων προσομοίωσης των BALs Si IV και C IV, τα οποία εγγυώνται όχι μόνο την καλύτερη δυνατή προσομοίωση αλλά κυρίως την μοναδικότητα αυτής. Το πρόβλημα του διαχωρισμό των μελών μιας διπλέτας συντονισμού ξεπερνιέται με τη χρήση του μοντέλου GR (Danezis et al. 2003, 2007, Lyratzi et al. 2007), το οποίο έχει αυτή τη δυνατότητα (βλέπε § 4.3.1). Προτού διατυπωθούν τα κριτήρια προσομοίωσης κρίνεται αναγκαίο να σημειωθούν τα εξής:

- Επιλέγεται η προσομοίωση διπλετών και όχι μονών φασματικών γραμμών επειδή στην περίπτωση των δεύτερων είναι πολύ δύσκολο να περιοριστεί ο αριθμός των συνιστωσών που απαιτούνται για την τελική προσομοίωση. Είναι γεγονός πως στην περίπτωση των μονών γραμμών, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των συνιστωσών τόσο καλύτερη η προσομοίωση.
- Δεν αντιμετωπίζονται οι διπλέτες ως μονές γραμμές, αλλά μελετάται η κάθε συνιστώσα μιας διπλέτας ξεχωριστά.
- Η μελέτη επικεντρώνεται σε BALQSOs οι οποίοι επιδεικνύουν BALs και των δύο ιόντων (Si IV, C IV) οι οποίες εκτείνονται στο ίδιο εύρος ταχυτήτων. Ο λόγος είναι ότι διαφορετικές μελέτες (Gibson et al. 2009, 2010; Capellupo et al. 2011, 2012; Filiz Ak et al. 2014) έχουν δείξει πως οι BALs του C IV δεν συνοδεύονται πάντα από BALs Si IV. Εξαιτίας, των διαφορετικών ενεργειακών επιπέδων των Si IV και C IV, το αέριο απορρόφησης μπορεί να μην έχει αρκετά πυκνές περιοχές για να δημιουργεί γραμμές απορρόφησης του Si IV.
- Θεωρούμε ότι τα Si IV και C IV ακολουθούν την ίδια κινηματική δομή καθώς και τα δύο ιόντα προέρχονται από τα ίδια νέφη απορρόφησης τα οποία χαρακτηρίζονται από παρόμοιες φυσικές συνθήκες . Πιο συγκεκριμένα, τα νέφη που παράγουν την BAL Si IV, σε έναν δεδομένο quasar είναι τα ίδια με εκείνα που παράγουν την BAL C IV.

Στην περίπτωση των Si IV και C IV, οι διπλέτες συντονισμού τις οποίες μελετήσαμε είναι αναμεμιγμένες μεταξύ τους (blended) και συνεπώς δεν είναι ευδιάκριτες (resolved). Αυτό σημαίνει ότι για να επιτευχθεί μια ακριβής προσομοίωση θα πρέπει:

α) Να εντοπιστούν κριτήρια σχέσεων μεταξύ των παραμέτρων των συνιστωσών τόσο μεταξύ των μελών μιας διπλέτας συντονισμού όσο και μεταξύ των δύο ιόντων (Si IV και C IV).

β) Όλα τα προηγούμενα για να πραγματοποιηθούν απαιτείται η ταυτόχρονη προσομοίωση των συνιστωσών του Si IV με τις αντίστοιχες συνιστώσες του C IV.

Με βάση τα προηγούμενα καταλήγουμε λοιπόν σε δύο κατηγορίες κριτηρίων (Stathopoulos et al. 2015). Η πρώτη κατηγορία κριτηρίων θέτει τους κατάλληλους περιορισμούς οι οποίοι αφορούν τις τιμές των παραμέτρων V_{rad}, τ₀, σ μεταξύ των δύο συνιστωσών μιας διπλέτας συντονισμού. Η δεύτερη ομάδα κριτηρίων θέτει τους περιορισμούς οι οποίοι εφαρμόζονται μεταξύ των δύο διαφορετικών ιόντων, δηλαδή των Si IV και C IV.

1. Κριτήρια μεταξύ της μπλε και κόκκινης συνιστώσας μιας διπλέτας συντονισμού (C IV λλ 1548.187, 1550.772 Å και Si IV λλ 1393.755, 1402.77 Å).

α) Ο αριθμός των μπλε και κόκκινων συνιστωσών μιας διπλέτας θα πρέπει να είναι ακριβώς ο ίδιος. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε 1548.187 Å (μπλε) συνιστώσα του C IV αντιστοιχεί μία 1550.772 Å (κόκκινη) συνιστώσα. Το ίδιο ισχύει και για το Si IV.

β) Κάθε μπλε συνιστώσα του C IV σε συγκεκριμένη ακτινική μετατόπιση (συγκεκριμένη ταχύτητα) έχει την αντίστοιχη κόκκινη συνιστώσα, στην ίδια ακτινική μετατόπιση. Το ίδιο ισχύει και για το Si IV. Παρόλα αυτά απαιτούμε η διαφορά στις ταχύτητες, στο κέντρο των γραμμών, μεταξύ των δύο γραμμών συντονισμού να μην διαφέρει ως προς τη θεωρητική τιμή περισσότερο από 2 velocity bins στο χώρο των ταχυτήτων (η συνθήκη αυτή υιοθετήθηκε από τους Wildy, Goad & Allen 2015). Στα φάσματα του SDSS ένα velocity bin αντιστοιχεί σε 69 km/s.

γ) Η μπλε συνιστώσα του C IV και η κόκκινη συνιστώσα του C IV στην ίδια ακτινική μετατόπιση, θα πρέπει να έχουν ακριβώς το ίδιο εύρος (FWHM). Το ίδιο ισχύει και για το Si IV.

δ) Στην περίπτωση των γραμμών εκπομπής ο λόγος των οπτικών βαθών μεταξύ της μπλε και κόκκινης συνιστώσας θα πρέπει να είναι $\tau_b/\tau_r = 2$ όπως καθορίζεται από την ατομική φυσική (Savage & Sembach 1991).

ε) Στην περίπτωση των γραμμών απορρόφησης ο λόγος αυτός είναι ελεύθερος να μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών 1: $1 \le \tau_b/\tau_r \le 2$: 1 έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της μερικής κάλυψης (Wampler et al. 1995, Barlow & Sargent 1997, Hamann et al. 1997a,b, Wildy et al. 2015).

Οι τέσσερις πρώτοι περιορισμού (α-δ) αποτελούν συνέπεια της ατομικής θεωρίας. Οι φασματικές γραμμές των Si IV και C IV, είναι διπλέτες συντονισμού οι οποίες παράγονται από ενεργειακά επίπεδα τα οποία προκύπτουν από την αλληλεπίδραση τροχιακής στροφορμής και ιδιοστροφορμής του ηλεκτρονίου. Για το λόγο αυτό οι δύο συνιστώσες μιας διπλέτας χαρακτηρίζονται από το ίδιο εύρος, η διαφορά μεταξύ των μηκών κύματος των συνιστωσών είναι καθορισμένη και ο λόγος των οπτικών τους βαθών καθορίζεται από το λόγο των oscillator strengths (Savage & Sembach 1991). Το τελευταίο κριτήριο (ε) όμως δεν είναι συνεπές με την ατομική θεωρία, εντούτοις υπάρχουν φυσικοί μηχανισμοί οι οποίοι εν δυνάμει μπορούν να παράγουν λόγο οπτικών βαθών, μεταξύ μπλε και κόκκινης συνιστώσας, ο οποίος να αποκλίνει από την θεωρητικά αναμενόμενη τιμή χωρίς να παραβιάζεται η ατομική θεωρία. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι:

- Φωτόνια του συνεχούς ή/και της BEL περιοχής τα οποία δεν απορροφώνται και/ή σκεδάζονται στην γραμμή παρατήρησης των απορροφητών (Ganguly et al. 1999).
- Μια συνάρτηση πηγής, δηλαδή τοπική εκπομπή του απορροφητή (Wampler et al. 1995).
- Μερική κάλυψης της πηγής του συνεχούς ή/και της BEL περιοχή (Wampler et al. 1995, Barlow & Sargent 1997, Hamann et al. 1997a, Ganguly et al. 1999). Εξαιτίας της μερικής κάλυψης η ακτινοβολία η οποία δεν υπόκειται σε απορρόφηση προκαλεί μεταβολές στα σχετικά βάθη των γραμμών συντονισμού.

2. Κριτήρια μεταξύ συνιστωσών του C IV και Si IV στην ίδια ακτινική ταχύτητα απομάκρυνσης από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής.

 α) Τα πλατιά αυλάκια απορρόφησης του C IV και Si IV αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών.

β) Κάθε μπλε συνιστώσα του C IV σε συγκεκριμένη ακτινική ταχύτητα έχει την αντίστοιχη μπλε συνιστώσα του Si IV στην ίδια ακτινική ταχύτητα. Το ίδιο ισχύει μεταξύ των κόκκινων συνιστωσών του C IV και του Si IV. Σημειώνεται επίσης πως η διαφορά μεταξύ των ταχυτήτων των Si IV_{blue} – C IV_{blue} και Si IV_{red} – C IV_{red} δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από το σφάλμα μέτρησης της ταχύτητας που είναι ~200 km/s.

γ) Στην περίπτωση που τα δύο ιόντα Si IV και C IV εντός των νεφών είναι ισοκατανεμημένα, και εμφανίζουν τον ίδιο συντελεστή κάλυψης θα πρέπει για διπλέτες Si IV και C IV που βρίσκονται στην ίδια ταχύτητα να ισχύει, τ_{blue}/τ_{red} (C IV) = τ_{blue}/τ_{red} (Si IV) όπου, τ_{blue} και τ_{red} είναι τα οπτικά βάθη της μπλε και κόκκινης συνιστώσας κάθε διπλέτας συντονισμού Si IV και C IV. Αν όμως για παράδειγμα το Si IV εντοπίζεται σε μικρότερη επιφάνεια του νέφους απορρόφησης από ότι ο C IV τότε η μερική κάλυψης της πηγή του συνεχούς από το Si IV είναι μικρότερη από την μερική κάλυψη του C IV και ως αποτέλεσμα θα μπορεί να είναι τ_{blue}/τ_{red} (C IV) \neq τ_{blue}/τ_{red} (Si IV).

Η δεύτερη ομάδα κριτηρίων βασίζεται στην υπόθεση ότι τα ιόντα Si IV και C IV ανήκουν στο ίδιο νέφος (άποψη η οποία έχει προταθεί και από τους Hamann et al. 2001, Hamann & Sabra 2004, Capellupo et al. 2012) και ακολουθούν την ίδια κινηματική δομή. Επιπροσθέτως, και τα δύο ιόντα θεωρείται ότι προέρχονται από περιοχή ίδιας θερμοκρασίας παρά τα διαφορετικά τους δυναμικά ιονισμού (Rauch et al. 1996). Επί της ουσίας τα Si IV και C IV θεωρούνται ιόντα υψηλού βαθμού ιονισμού τα οποία δημιουργούνται σε περιοχές θερμοκρασίας $10^4 - 10^5 K$.

Τέλος, σημειώνεται ότι η εφαρμογή των κριτηρίων προσομοίωσης επιβάλλεται κατά την διαδικασία της προσομοίωσης των BALs Si IV και C IV, δηλαδή τα κριτήρια αποτελούν τους περιορισμούς που τίθενται κατά την διαδικασία προσομοίωσης προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσομοίωση και να εξασφαλιστεί η μοναδικότητα αυτής.

4.4. Το λογισμικό ASTA

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η μελέτη τόσο απλών όσο και σύνθετων φασματικών γραμμών (BALS, BELS, DACs, SACs) μέσω ενός μοντέλου, θα πρέπει το

μοντέλο να εκφράζεται μέσω ενός λογισμικού το οποίο και θα ενσωματώνει όλα τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στις προηγούμενες παραγράφους. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε το λογισμικό ASTA (Astrophysical Spectroscopy Team of Athens) (Tzimeas et al. 2019) το οποίο χαρακτηρίζεται από μια σειρά λειτουργιών. Οι βασικότερες λειτουργίες του λογισμικού που χρησιμοποιούνται στην εν λόγω διατριβή είναι:

- 1. Προετοιμασία του φάσματος
 - Αφαίρεση ερυθρομετάθεσης
 - Εφαρμογή φίλτρου εξομάλυνσης θορύβου (smoothing filter)
 - Χάραξη συνεχούς νόμου δύναμης με χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης Levenberg-Marquardt
 - Κανονικοποίηση φάσματος
- 2. Προσομοίωση φασματικών γραμμών εκπομπής και απορρόφησης
 - Εφαρμογή της εξίσωσης (4.1)
 - Χρήση πέντε διαφορετικών κατανομών: Lorentz, Gauss, Voigt, Rotation, Gauss-Rotation
 - Προσομοίωση σύνθετων φασματικών γραμμών μέσω πολλαπλών συνιστωσών σύμφωνα με την Εξ. (4.1)
 - Διαχωρισμός των δύο μελών (μπλε και κόκκινης) μιας διπλέτας συντονισμού.
 - Ταυτόχρονη προσομοίωση διαφορετικών ιόντων.
 - Εφαρμογή κριτηρίων προσομοίωσης τα οποία εξασφαλίζουν την μοναδικότητα της τελικής προσομοίωσης, του αριθμού των συνιστωσών και των τιμών των υπολογιζόμενων φυσικών παραμέτρων.
 - Έλεγχος καλής προσαρμογής ($\chi^2_{reduced}$)
- Υπολογισμός Φυσικών παραμέτρων ανάλογα με την κατανομή που χρησιμοποιείται προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσαρμογή μιας φασματικής γραμμής.
 - Οπτικό βάθος στο κέντρο της γραμμής (τ₀)
 - FWHM
 - Ακτινική ταχύτητα (V_{rad})
 - Ισοδύναμο εύρος (EW)

Στον Πίνακα 4.1 παρέχονται τα βασικά χαρακτηριστικά τα οποία διαφοροποιούν το ASTA από άλλα ευρέως διαδεδομένα λογισμικά, στο πεδίο της αστροφυσικής φασματοσκοπίας.

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το λογισμικό ASTA και τις δυνατότητές του παρέχονται στον σύνδεσμο: <u>http://spectroscopyteam.edu.gr/index.php/asta-software.</u>

Apps/ features	Graphic User Interface	Number of Distributions	DACs/BALs/BELs Analysis within multicomponent model	Parameters	Multi - component fit	Simultaneous fitting of multiple ions with parameters tied	Deblending of Unresolved resonance lines	Unique number of component of DACs/BALs/BELs	Component parameter values uniqueness
SpecView	yes	4 (Gauss, Lorentz, Voigt, Logarithmic)	no	FWHM, Equivalent Width, optical depth, position	limited	no	no	no	no
PROFIT	yes	1 (Gauss for emission lines)	no	FWHM, Equivalent Width, optical depth, position		no	no	no	no
DIPSO	no	2 (Gauss, Triangular)	no	FWHM, Equivalent Width, optical depth, position	Limited (mainly for emission lines)	no	no	no	no
SPLAT	yes		no	FWHM, Equivalent Width, optical depth, position	no	no	no	no	no
IRAF	No/few packages have their own	3 (Gauss, Lorentz, Voigt)	no	FWHM, Equivalent Width, optical depth, position	limited	no	no	no	no
ASTA	yes	5 (Gauss, Lorentz, Voigt, Rotation, Gauss- Rotation)	yes	FWHM, Equivalent Width, optical depth, position, column density	Large parameter space	yes	yes	yes	yes

Πίνακας 4.1. Στον πίνακα παρουσιάζονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά στα οποία διαφοροποιείται το ASTA από τα υπόλοιπα λογισμικά

Κεφάλαιο 5

Τα παρατηρησιακά δεδομένα και η μελέτη τους

5.1. Τα φάσματα των 20 BALQSOs

Στην εν λόγω διδακτορική διατριβή μελετώνται οι φασματικές γραμμές απορρόφησης των Si IV και C IV στην περίπτωση 20 BALQSOs, οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Πιο συγκεκριμένα, οι BALs Si IV και C IV αναλύονται στον ακριβή αριθμό συνιστωσών από τις οποίες αποτελούνται και υπολογίζονται οι ακτινικές ταχύτητες, τα FWHM, τα οπτικά βάθη και τα ισοδύναμα εύρη των συνιστωσών που αντιστοιχούν στις φυσικές συνθήκες των νεφών που τις δημιουργούν. Γίνεται στατιστική μελέτη των αποτελεσμάτων προκειμένου να εξαχθούν γενικευμένα συμπεράσματα που αφορούν την BAL περιοχή και τα νέφη της. Σημειώνεται ότι για πρώτη φορά γίνεται ακριβής προσομοίωση των σύνθετων BAL προφίλ των διπλετών Si IV και C IV μέσω ανάλυσης κάθε γραμμής συντονισμού στις επιμέρους διπλέτες από τις οποίες αποτελείται. Τέλος, σε 10 εξ αυτών των BALQSOs μελετάται η μεταβλητότητα των BALs Si IV και C IV μεταξύ δύο εποχών προκειμένου να καθοριστεί ο μηχανισμός (ή οι μηχανισμοί) ο οποίος είναι υπεύθυνος για την πρόκληση της μεταβλητότητας. Η χρονική απόσταση μεταξύ των δύο εποχών κυμαίνεται από 6 έως 13 έτη. Τα φάσματα των 20 BALQSOs έχουν ληφθεί από τη βάση δεδομένων SDSS.

5.2. Η Βάση Δεδομένων SDSS (Sloan Digital Sky Survey Data Release 9 και 10)

Ο κατάλογος SDSS DR 9 (Paris et al. 2012) είναι το προϊόν της αποστολής Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) του προγράμματος Sloan Digital Sky Survey III. Ο κατάλογος περιλαμβάνει συνολικά 87822 quasars με $M_i < -20.5$ (για Κοσμολογία με $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0.3 \text{ και } \Omega_\Lambda = 0.7$), οι οποίοι φέρουν τουλάχιστον μία γραμμή εκπομπής με FWHM > 500 km/s ή φέρουν πολύπλοκες γραμμές απορρόφησης. Ο κατάλογος περιλαμβάνει επίσης όλους τους γνωστούς quasars από τις αποστολές SDSS-I και II. Οι quasars αυτού του καταλόγου έχουν ευρθρομεταθέσεις μεταξύ 0.0033 < z < 7. Τα φάσματα καλύπτουν την περιοχή μηκών κύματος μεταξύ 3600-10500 Å ενώ η φασματική ανάλυση κυμαίνεται στο εύρος 1300 < R < 2500. Τέλος, σημειώνεται ότι ο κατάλογος περιέχει 7533 BAL quasars.

Ο κατάλογος SDSS DR 10 (Paris et al. 2014) αποτελεί συνέχεια του καταλόγου DR9 και περιλαμβάνει συνολικά 166 583 quasars από τους οποίους οι 16461 είναι BAL quasars.

Τα φάσματα του SDSS είναι ταξινομημένα (binned) έτσι ώστε να έχουν σταθερή λογαριθμική διασπορά, ενώ το μέγεθος του pixel είναι σταθερό στο χώρο των ταχυτήτων και ίσο με 69 km/s = ln(10) * c * 0.0001 όπου 0.0001 είναι η log(10) διασπορά ανά pixel. Καθώς τα φάσματα είναι ταξινομημένα σε σταθερό $log(\lambda)$ το μήκος κύματος λ μπορεί να εξαχθεί μέσω της σχέσης:

$$\lambda = 10^{(\text{coeff0+coeff1}*i)} \tag{5.1}$$

όπου οι σταθερές coeff0 και coeff1 παρέχονται από τη βάση δεδομένων του SDSS, για το εκάστοτε φάσμα, ενώ i είναι ο αριθμός του εκάστοτε pixel, όπου το πρώτο pixel του φάσματος παίρνει την τιμή i=0, το δεύτερο την τιμή i=1 κ.ο.κ.

Πίνακας 5.1. Δεδομένα των 20 BALQSOs. Στην πρώτη στήλη δίνεται ο αύξων αριθμός, στη δεύτερη στήλη δίνεται το όνομα του BALQSO και σε παρένθεση τα στοιχεία Plate, MJD (Modified Julian Date) και fiber, στην τρίτη στήλη δίνεται η ερυθρομετάθεση εκάστου BALQSO, στην τέταρτη στήλη η υπεροχή χρώματος, στην πέμπτη στήλη το σήμα προς θόρυβο και στην τελευταία στήλη ο φασματικός δείκτης του νόμου δύναμης του συνεχούς. Οι δέκα πρώτοι BALQSOs είναι αυτοί στους οποίους μελετάται η μεταβλητότητα των BALS Si IV και C IV μεταξύ δύο διαφορετικών εποχών.

#	SDSS Name	z	E(B-V)	S/N median	α
1	J114548.38+393746.6 (spec-1997-53442-450)	3.124 ª	0.0188 +/- 0.0007	16.2476	-1.56±0.03
	J114548.38+393746.6 (spec-4654-55659-856)	3.124ª	0.0188+/- 0.0007	22.2583	-1.34±0.03
2	J101056.69+355833.3 (spec-1951-53389-0579)	2.300 ^b	0.01+/- 0.0010	11.8958	-1.85 ± 0.02
	J101056.69+355833.3 (spec-568-55600-0440)	2.300 ^b	0.01+/- 0.0010	14.6122	-1.44 ± 0.04
3	J114704.46+153243.3 (spec-1761-53376-0574)	3.092ª	0.0405 +/- 0.0006	6.6929	-1.33 ± 0.03
	J114704.46+153243.3 (spec-5383-56013-0492)	3.092ª	0.0405 +/- 0.0006	9.6465	-1.97 ± 0.04
4	J155335.78+324308.1 (spec-1403-53227-0075)	2.174ª	0.0221 +/- 0.0013	16.3191	-1.49 ± 0.02
	J155335.78+324308.1 (spec-4966-55712-0266)	2.174ª	0.0221 +/- 0.0013	31.2362	-1.89 ± 0.05
5	J003135.57+003421.2 (spec-0689-52262-0502)	2.236ª	0.0204 +/- 0.0005	14.3394	-1.59 ± 0.03
	J003135.57+003421.2 (spec-3587-55182-0570)	2.236ª	0.0204 +/- 0.0005	20.4971	-2.15 ± 0.03
6	J023252.80-001351.1 (spec-3615-55179-0030)	2.028ª	0.0199 +/- 0.0006	21.1111	-1.91 ± 0.02
	J023252.80-001351.1 (spec-4239-55458-0398)	2.028ª	0.0199 +/- 0.0006	21.2087	-0.91 ± 0.03
7	J085746.61+513444.4 (spec-0551-51993-0519)	1.972°	0.0164 +/- 0.0002	11.8216	-1.66 ± 0.05
	J085746.61+513444.4 (spec-7304-56745-0584)	1.972°	0.0164 +/- 0.0002	18.8236	-1.52±0.05
8	J112742.98+022441.8 (spec-0512-51992-0520)	1.937 °	0.0338+/- 0.0010	6.5186	-1.20±0.04

	J112742.98+022441.8 (spec-4730-55630-0818)	1.937 °	0.0338+/- 0.0010	8.6490	-0.79 ± 0.04
9	J113527.25+385744.1 (spec-1972-53466-0263)	1.944 ^c	0.0194 +/- 0.0004	13.5086	-1.81 ± 0.03
	J113527.25+385744.1 (spec-4648-55673-0830)	1.944 ^c	0.0194 +/- 0.0004	18.1723	-1.57 ± 0.05
10	J091307.83+442014.3 (spec-832-52312-195)	2.936°	0.0128 +/- 0.0004	17.5430	-0.40 ± 0.04
	J091307.83+442014.3 (spec-4687-56369-0700)	2.936 °	0.0128 +/- 0.0004	35.9893	-0.72 ± 0.03
11	J151601.51+430931.4 (spec-6048-56072-0147)	2.630 °	0.0227 +/- 0.0004	19.4290	-0.265 ± 0.05
12	J023908.98-002121.3 (spec-4240-55455-0434)	3.740 °	0.0277 +/- 0.0019	10.0487	-1.974 ± 0.05
13	J015921.53+141043.1 (spec-0427-51900-0383)	3.103 °	0.0462 +/- 0.0006	9.4060	0.177 ± 0.04
14	J004527.68+143816.1 (spec-0419-51879-0104)	1.992 ^c	0.0917 +/- 0.0026	29.7789	-0.497 ± 0.03
15	J005419.99+002727.9 (spec-0394-51913-0511)	2.490°	0.0220 +/- 0.0010	27.4516	-0.944 ± 0.04
16	J062012.88+833206.9 (spec-2548-54152-0557)	2.771 ^c	0.0516 +/- 0.0010	19.6815	-1.274 ± 0.06
17	J223841.89+142154.9 (spec-1893-53239-0379)	2.294°	0.0558 +/- 0.0011	9.7805	-1.278 ± 0.05
18	J022844.09+000217.0 (spec-3615-55208-0780)	2.706 ^c	0.0210 +/- 0.0005	29.2076	-0.902 ± 0.04
19	J141546.24+112943.4 (spec-1705-53848-0590)	2.560°	0.0200 +/- 0.0008	35.1300	-1.082 ± 0.05
20	J135559.03-002413.6 (spec-4037-55631-0486)	2.806 d	0.0195 +/- 0.0010	37.4900	-2.062±0.04

^a Filiz Ak et al. 2013 ^b Wildy et al. 2014 ^cShen et al. 2011 ^d Paris et al. 2017

5.3. Κριτήρια Επιλογής Φασμάτων

Οι 20 BALQSOs έχουν επιλεχθεί από ένα δείγμα 2005 BALQSOs του SDSS οι οποίοι είναι χαρακτηρισμένοι ως VARBAL²² και έχουν χαρακτηρισθεί ως μεταβαλλόμενοι. Οι 2005 BALQSOs έχουν επιλεχθεί ώστε να είναι οπτικά λαμπροί και να χαρακτηρίζονται από τουλάχιστον μέτρια απορρόφηση μίας εκ των BAL τους (balnicity index BI₀ > 100 km/ s). Από το εν λόγω δείγμα επιλέχθηκαν εκείνοι οι quasars που πληρούν τα κάτωθι κριτήρια:

- 1. Τα φάσματα να χαρακτηρίζονται από zWarning = 0 που σύμφωνα με τη βάση SDSS σημαίνει ότι δεν φέρουν κάποιο γνωστό πρόβλημα.
- Ερυθρομετάθεση 1.98 < z < 3.2 όπου το κάτω όριο έχει τεθεί έτσι ώστε να υπάρχει φασματική παρατήρηση του Si IV, καθώς η εν λόγω έρευνα εστιάζει στη μελέτη των BALs Si IV και C IV.

²² <u>http://www.sdss3.org/dr9/algorithms/ancillary/balvarqso.php</u>

- 3. Οι BALQSOs που επιλέχθηκαν να φέρουν πλατιά αυλάκια απορρόφησης Si IV και C ΙV τα οποία να εκτείνονται στο ίδιο εύρος ταχυτήτων.
- 4. Ο λόγος του σήματος προς τον θόρυβο του εκάστοτε φάσματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 10 [(S/N)_{median} \gtrsim 10] (Wang, et al. 2015).

Στο εύρος ερυθρομετατοπίσεων 1.98 < z < 3.2 εντοπίστηκαν 618 quasars με Si IV και/ή C IV BALs. Από αυτούς απορρίφθηκαν 161 καθώς έφεραν C IV BALs χωρίς να υπάρχει η αντίστοιχη BAL Si IV στις ίδιες ακτινικές ταχύτητες. Συνολικά απέμειναν 461 quasars οι οποίοι πληρούν τα κριτήρια επιλογής. Από αυτό τον αριθμό επιλέχθηκαν 20 quasars οι οποίοι χαρακτηρίζονται από:

- 1. $V_{outflow}^{max}$ < 20000 km/s έτσι ώστε να αποφεύγεται αλληλοεπικάλυψη μεταξύ της BAL του Si IV και των εκπομπών Si II λ1304 Å και O I λ1306 Å. Συνήθως η φασματική περιοχή απορρόφησης του Si IV αλληλεπικαλύπτεται με τις γραμμές εκπομπής του OI 1306 Å (στα ≈ -21.800 km/s από την εκπομπή του Si IV), το Si II 1304 Å (στα ≈ -21.300 km/s από την εκπομπή του Si IV). Οι εν λόγω γραμμές εκπομπής είναι συνήθως ιδιαίτερα ασθενείς, όμως σε αρκετές των περιπτώσεων αυτά τα χαρακτηριστικά εκπομπής μπορούν να επηρεάσουν τα αυλάκια απορρόφησης του Si IV.
- 2. Φάσματα τα οποία να φέρουν BALs Si IV και C IV, διαφορετικών τύπων προφίλ, όπως: ομαλά, τύπου P-Cygni προφίλ τα οποία εκκινούν κοντά σε μηδενική ταχύτητα εκροής, «σπασμένα» προφίλ τα οποία να φέρουν πολλαπλά και διακριτά φασματικά χαρακτηριστικά απορρόφησης, απορροφήσεις αποκομμένες από την αντίστοιχη εκπομπή για περισσότερο από 3.000 km/s, προφίλ με πολλαπλές κοιλάδες απορρόφησης στα οποία η απορρόφηση είναι αποκομμένη από την εκπομπή για περισσότερο από 3.000 km/s.

Σημειώνεται ότι το χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο διαφορετικών παρατηρήσεων, για το δείγμα των 10 BALQSOs, στους οποίους μελετάται η μεταβλητότητα, κυμαίνεται από ~6 έτη έως ~13 έτη.

5.4. Προετοιμασία φάσματος

Τα επιλεγμένα φάσματα έχουν διορθωθεί ως προς την Γαλαξιακή εξασθένιση (Galactic Extinction), θεωρώντας την καμπύλη εξασθένησης των Fitzpatrick & Massa (1999) με $R_V = 3.1$. Οι τιμές του A_V προέρχονται από τους πίνακες SpecPhotoAll του SDSS. Η διαδικασία της διόρθωσης έγινε χρησιμοποιώντας την ρουτίνα fm_unred.pro της IDL. Το επόμενο βήμα είναι η αφαίρεση της ερυθρομετάθεσης από τα φάσματα. Εν συνεχεία, τα φάσματα εξομαλύνονται (smoothed) χρησιμοποιώντας ένα average filter διαφορετικού εύρους για κάθε quasar το οποίο εξαρτάται από το λόγο σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio - SNR) του εκάστοτε φάσματος. Ο λόγος που γίνεται η χρήση φίλτρου είναι για την εξομάλυνση του θορύβου και για την ελάττωση της επίδρασης των BALQSOs. Τόσο η αφαίρεση της ερυθρομετάθεσης όσο και η εφαρμογή του φίλτρου γίνονται μέσω του λογισμικού ASTA.

5.5. Διαδικασία προσομοίωσης των BALs Si IV και C IV

5.5.1. Προσομοίωση του συνεχούς

Για το συνεχές γίνεται χρήση ενός νόμου δύναμης της μορφής:

$$F(\lambda) = F_{2000} \times \left(\frac{\lambda}{2000}\right)^a$$
(5.2)

όπου το σφάλμα της ροής της συνεχούς ακτινοβολίας σε κάθε μήκος κύματος λ δίνεται από τη σχέση:

$$\delta(F_{\rm con}) = F_{\lambda} \times \sqrt{\left(\frac{\delta F_{2000}}{F_{2000}}\right)^2 + (\ln\lambda - \ln 2000)^2 \delta \alpha^2}$$
(5.3)

το σφάλμα δF_{2000} παρέχεται από τα στοιχεία του φάσματος ενώ το σφάλμα δα του φασματικού δείκτη προέρχεται μέσω της διαδικασίας της καλύτερης προσομοίωσης. Τα παράθυρα μηκών κύματος τα οποία επιλέγονται προκειμένου να «περάσει» ο νόμος δύναμης είναι τα: (1290-1300 Å, 1445-1465 Å, 1685-1715 Å, 1965-2000 Å). Η επιλογή των συγκεκριμένων παραθύρων έχει γίνει διότι στα εν λόγω μήκη κύματος δεν παρατηρούνται έντονες γραμμές εκπομπής/απορρόφησης. Προκειμένου να γίνει η καλύτερη δυνατή προσομοίωση του συνεχούς μέσω του νόμου δύναμης γίνεται χρήση του λογισμικού ASTA το οποίο εφαρμόζει τη μεθόδου ελαχιστοποίησης Levenberg – Marquardt. Οι τιμές του φασματικού δείκτη α ± δα για το σύνολο των μελετώμενων BALQSOs παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

5.5.2. Προσομοίωση των BELs

Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να γίνει η ορθή μελέτη των BALs και να καθοριστούν επακριβώς τα όριά τους θα πρέπει να γίνει ο διαχωρισμός τους από τις αντίστοιχες BELs. Προκείμενου να γίνει αυτό θα πρέπει να γίνεται συγχρόνως η καλύτερη δυνατή προσαρμογή (best fit), μέσω πολλαπλών συνιστωσών, και των δύο φασματικών προφίλ. Ο έλεγχος των fit, μέσω μαθηματικών ελέγχων, κατέδειξε ότι το best fit των BELs επιτυγχάνεται όταν οι συνιστώσες τους περιγράφονται από την κατανομή Voigt. Για την επίτευξη των best fit των BELs Si IV (λλ 1393.755, 1402.77 Å) και C IV (λλ 1548.187, 1550.772 Å) στην περίπτωση των 20 μελετώμενων BALQSOs έχουν χρησιμοποιηθεί από μία έως τρεις συνιστώσες για το κάθε μέλος (μπλε, κόκκινη) της διπλέτας συντονισμού. Σημειώνεται ότι η μελέτη των γραμμών εκπομπής, καθώς έχει επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσαρμογή τους, αποτελεί μελλοντικό ερευνητικό έργο και δεν εμπίπτει στα πλαίσια της εν λόγω διδακτορικής διατριβής.

5.5.3. Προσομοίωση των BALs

Στην περίπτωση των BALs, οι οποίες είναι το προϊόν της σύνθεσης επιμέρους φασματικών γραμμών, το πρόβλημα της εύρεσης της καλύτερης δυνατής προσαρμογής είναι διττό. Δεν αναζητείται μόνο εκείνη η συνάρτηση η οποία είναι ικανή να δώσει το best fit κάθε μίας από τις επιμέρους φασματικές γραμμές που συνιστούν την BAL, αλλά και εκείνη η τελική συνάρτηση που μπορεί να δώσει το best fit του συνολικού σύνθετου προφίλ της BAL (βλέπε § 4.3.1).

Ο μαθηματικός έλεγχος κατέδειξε ότι η καλύτερη προσαρμογή (best fit) των συνιστωσών κάθε BAL επιτυγχάνεται όταν οι συνιστώσες τους περιγράφονται από την κατανομή Gauss.

Αυτό το οποίο θα πρέπει να διασφαλίζεται θα πρέπει να είναι το μονοσήμαντο του αριθμού των συνιστωσών κάθε BAL, καθώς και των τιμών των υπολογιζόμενων παραμέτρων. Για τους λόγους αυτούς, στη μελέτη των BALs, Si IV και CIV γίνεται χρήση:

- Του μοντέλου GR (Danezis et al. 2003, 2007, Lyratzi et al. 2007) το οποίο δίνει την τελική συνάρτηση (Εξίσωση 4.1) η οποία προσομοιώνει το συνολικό προφίλ της BAL, και έχει προκύψει από την επίλυση διάδοσης της ακτινοβολίας σε σύνθετη ατμόσφαιρα αποτελούμενη από, περισσότερα του ενός, νέφη απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης Συγχρόνως το μοντέλο GR προσφέρει τη δυνατότητα μελέτης κάθε μίας συνιστώσας μιας διπλέτας συντονισμού ξεχωριστά.
- Των κριτηρίων προσομοίωσης των BALs Si IV και C IV (Stathopoulos et al. 2015, 2019) τα οποία παρουσιάζονται στην §4.3.4. και εξασφαλίζουν την μοναδικότητα του αριθμού των συνιστωσών του best fit και των τιμών των μετρούμενων φυσικών παραμέτρων των νεφών.
- Του φυσικού μοντέλου των BAL νεφών (Stathopoulos et al. 2015) το οποίο παρουσιάζεται στην § 4.2.

5.5.3.1. Διαδικασία καλύτερης προσαρμογής (Best Fitting Process)

Όπως προαναφέρθηκε, η επιδίωξη της καλύτερης προσαρμογής (best fit) μιας καμπύλης σε ένα σύνολο σημείων, όπως αυτά ενός φασματικού προφίλ, είναι η διαδικασία αναζήτησης της μαθηματικής συνάρτησης, η οποία παρεμβαλλόμενη στα σημεία του φάσματος, κάτω από πολύ συγκεκριμένους περιορισμούς, μπορεί να δώσει την ελάχιστη δυνατή απόκλιση από αυτά. Η διαδικασία που ακολουθείται προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσαρμογή είναι η εξής:

Για την καλύτερη δυνατή προσαρμογή των συνιστωσών Si IV και C IV χρησιμοποιείται η κατανομή Gauss η οποία καθορίζεται από τρεις παραμέτρους (V_{rad} , τ_0 , σ). Αρχικά, επιχειρείται η προσαρμογή τόσο της μπλε γραμμής των διπλετών Si IV (λ 1393.755 Å), C IV (λ 1548.187 Å) όσο και της κόκκινης γραμμής των διπλετών Si IV (λ 1402.77 Å), C IV (λ 1550.772 Å) μέσω μίας συνιστώσας. Τηρώντας αυστηρά τα κριτήρια προσομοίωσης, πραγματοποιείται επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία μεταβάλλονται οι τιμές των παραμέτρων (σύμφωνα με τα κριτήρια προσομοίωσης) και η καλύτερη προσαρμογή ελέγχεται μέσω του $\chi^2_{reduced}$. Αν η προσαρμογή δεν είναι

ικανοποιητική, τότε εισάγεται δεύτερη συνιστώσα τόσο για την προσαρμογή των μπλε όσο και των κόκκινων γραμμών. Τηρώντας τα κριτήρια, επαναλαμβάνεται η ανωτέρω διαδικασία και η προσαρμογή ελέγχεται μέσω του $\chi^2_{reduced}$. Η διαδικασία εισαγωγής συνιστωσών και μεταβολής των παραμέτρων συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί $\chi^2_{reduced} \leq 2$ και για τις δύο BALs (Si IV και C IV), οι οποίες προσομοιώνονται συγχρόνως, αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών και πληρούνται όλα τα κριτήρια προσομοίωσης.

Για παράδειγμα, κάθε φορά που εισάγεται από τον χρήστη μια μπλε συνιστώσα Si IV, με αρχικές παραμέτρους (V_{rad} , τ_0 , σ), αυτομάτως καθορίζονται οι τιμές των παραμέτρων της αντίστοιχης κόκκινης συνιστώσας του Si IV (ίδια Vrad, σ και $\tau_b/\tau_r =$ 2). Συγχρόνως καθορίζεται και η ταχύτητα V_{rad} της μπλε συνιστώσας του C IV η οποία θα πρέπει να είναι ίδια με την ταχύτητα της μπλε συνιστώσας του Si IV. Οι αρχικές τιμές των τ_0 , σ της μπλε συνιστώσας του C IV καθορίζονται από τον χρήστη. Από τις τιμές της μπλε συνιστώσας του C IV καθορίζονται αυτομάτως, βάση των κριτηρίων, οι τιμές των παραμέτρων V_{rad} , τ_0 , σ της αντίστοιχης κόκκινης συνιστώσας του C IV. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει κάθε φορά που μεταβάλλεται η τιμή μίας η περισσοτέρων παραμέτρων της μπλε/κόκκινης συνιστώσας ενός εκ των δύο ιόντων. Δηλαδή, βάση των κριτηρίων οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων του δεύτερου ιόντος.

Κάθε φορά που αυξάνεται ο αριθμός των συνιστωσών (διατηρώντας ίσο αριθμό συνιστωσών μεταξύ των δύο ιόντων), ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία και ελέγχεται η προσομοίωση μέσω του ελαχιστοποιημένου χ². Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου επιτευχθεί $\chi^2_{reduced} \le 2$ (Laor et al. 1994) και για τα δύο ιόντα. Σημειώνεται ότι κατά τη διαδικασία προσομοίωσης αναζητείται ο ελάχιστος αλλά και ίσος αριθμός συνιστωσών μεταξύ Si IV και C IV που ικανοποιεί το κριτήριο $\chi^2_{reduced} \leq 2$. Στην Εικόνα 5.1. παρουσιάζεται η προσομοίωση των BALs Si IV και C IV από μία έως οχτώ συνιστώσες για κάθε μέλος της διπλέτας συντονισμού. Σε κάθε σχήμα, σταδιακά εισάγεται μια νέα συνιστώσα ώστε να βελτιωθεί η παρεμβολή της τελικής συνάρτησης, ως σύνθεση επιμέρους συνιστωσών, στα παρατηρούμενα σημεία του φάσματος. Σε κάθε σχήμα παρέχεται ο αριθμός των συνιστωσών και η τιμή του $\chi^2_{reduced}$. Κάτω από κάθε fit παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα η διαφορά (residual) μεταξύ παρατηρούμενου φάσματος και της καλύτερης δυνατής προσαρμογής. Σημειώνεται ότι η καλύτερη δυνατή προσαρμογή (περίπτωση (h)) επιτυγχάνεται μέσω οκτώ συνιστωσών για κάθε μέλος μιας διπλέτας συντονισμού καθώς για αυτήν ισχύει $\chi^2_{reduced} \leq 2$ τόσο για τον C IV όσο και για το Si IV. Πιο συγκεκριμένα, για την προσαρμογή των BALs Si IV και C IV χρησιμοποιούνται οκτώ συνιστώσες για τις μπλε γραμμές (λ1393.755 Å για το Si IV και λ1548.187 Å για τον C IV) και οκτώ συνιστώσες για τις κόκκινες γραμμές (λ1402.77 Å για το Si IV και λ1550.772 Å για τον C IV). Τέλος, σημειώνεται ότι η τελευταία περίπτωση (h) είναι η μόνη στην οποία εφαρμόζονται πλήρως όλα τα κριτήρια προσομοίωσης (βλέπε § 4.3.4).

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση μελέτης της μεταβλητότητας, ακολουθείται η ίδια διαδικασία προκειμένου να γίνει η καλύτερη δυνατή προσαρμογή των BALs διαφορετικών χρονικών περιόδων. Όμως, τα φάσματα δύο διαφορετικών εποχών προσομοιώνονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, δηλαδή όλη η διαδικασία καλύτερης προσαρμογής και εφαρμογής των κριτηρίων γίνεται ανεξάρτητα για τις BALs της πρώτης και δεύτερης περιόδου.

Μέσω της ανωτέρω διαδικασίας εξασφαλίζεται ότι η τελική προσομοίωση, ο αριθμός των συνιστωσών και οι τιμές των παραμέτρων είναι καθορισμένα με μοναδικό τρόπο.

5.6. Σφάλματα

Ο τρόπος υπολογισμού των σφαλμάτων στις μετρούμενες παραμέτρους γίνεται μέσω εισαγωγής Γκαουσιανού θορύβου στο best fit. Το εύρος της Γκαουσιανής σε κάθε pixel ισούται με την αβεβαιότητα της ροής σε κάθε pixel. Για κάθε best fit παράγουμε 60 επιμέρους φάσματα με Γκαουσιανό θόρυβο και προσομοιώνουμε κάθε ένα από αυτά με τον ίδιο τρόπο όπως και το αρχικό φάσμα. Η αβεβαιότητα σε κάθε παράμετρο είναι η RMS τιμή μεταξύ των 60 αποτελεσμάτων.

5.7. Διορθώσεις

Τα πραγματικά FWHM των συνιστωσών απορρόφησης υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη το FWHM του οργάνου παρατήρησης, κάνοντας χρήση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$FWHM_{obs}^{2} = FWHM_{true}^{2} + (1+z)^{-2}FWHM_{inst}^{2}$$
(5.4)

όπου το FWHM_{inst} του φασματογράφου είναι στο παρατηρούμενο σύστημα αναφοράς, ενώ τα FWHM_{obs} και FWHM_{true} είναι στο εργαστηριακό σύστημα αναφοράς (Rafiee & Hall 2011).



Εικόνα 5.1. Διαδικασία προσομοίωσης των BALs Si IV και C IV. Τα μαύρα σημεία αντιστοιχούν στα παρατηρούμενα σημεία του φάσματος και η συνεχής μαύρης γραμμή στην καλύτερη δυνατή προσαρμογή (best fit). Κάτω από κάθε προσομοίωση παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα η διαφορά μεταξύ παρατηρούμενου φάσματος και best fit (residual). a) προσομοίωση μέσω μίας συνιστώσας για κάθε μέλος της διπλέτας συντονισμού, b) προσομοίωση μέσω δύο συνιστωσών για κάθε μέλος της διπλέτας συντονισμού, c) προσομοίωση μέσω τριών συνιστωσών για κάθε μέλος της διπλέτας συντονισμού, d) προσομοίωση μέσω τεσσάρων συνιστωσών για κάθε μέλος της διπλέτας συντονισμού, e) προσομοίωση μέσω πέντε συνιστωσών για κάθε μέλος της διπλέτας συντονισμού τόσο του C IV όσο και του Si IV, f) προσομοίωση μέσω έξι συνιστωσών για κάθε μέλος της διπλέτας συντονισμού τόσο του C IV όσο και του Si IV, g) προσομοίωση μέσω επτά συνιστωσών για κάθε μέλος της διπλέτας συντονισμού τόσο του C IV όσο και του Si IV, h) προσομοίωση μέσω οχτώ συνιστωσών για κάθε μέλος της διπλέτας συντονισμού τόσο του C IV όσο και του Si IV. Η τελευταία προσαρμογή αποτελεί και την καλύτερη δυνατή καθώς $\chi^2_{\rm reduced} \leq$ 2 τόσο για το Si IV όσο και για τον C IV. Στις εικόνες μπορεί κανείς να παρατηρήσει, μέσω της τιμής του $\chi^2_{reduced}$ και του residual, την σταδιακή βελτίωση της προσαρμογής κατά την σταδιακή εισαγωγή συνιστωσών.



Εικόνα 5.1. Συνέχεια


Εικόνα 5.1. Συνέχεια

Κεφάλαιο 6

Ανάλυση Μετρήσεων

6.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης των 20 BALQSOs

Κάνοντας χρήση του μοντέλου GR (Danezis et al. 2003a, 2007, 2009; Lyratzi et al. 2007), του φυσικού μοντέλου και των κριτηρίων προσομοίωσης των Stathopoulos et al. (2015, 2019) και το λογισμικό ASTA (Tzimeas et al. 2019) οι κοιλάδες απορρόφησης (BALs) των Si IV και C IV, 20 BALQSOs, αναλύονται στον ακριβή και μοναδικά καθορισμένο αριθμό συνιστωσών απορρόφησης από τις οποίες αποτελούνται. Ως αποτέλεσμα είναι δυνατή η μελέτη της κάθε συνιστώσας απορρόφησης ξεχωριστά. Αυτό σημαίνει ότι μια BAL δεν αντιμετωπίζεται ούτε μελετάται ως ένας ενιαίος σχηματισμός αλλά μελετάται κατά περιοχές οι οποίες δεν είναι αυθαίρετα καθορισμένες αλλά αποτελούν τις συνιστώσες απορρόφησης που προκαλούνται από πραγματικές φυσικές δομές (νέφη) εντός του βίαιου περιβάλλοντος της εκροής που πηγάζει από τις κεντρικές περιοχές εκάστου quasar.

Στην Εικόνα 6.1 παρουσιάζονται δύο παραδείγματα (J155335.78+324308.1, spec-4966-55712-0266 και J101056.69+355833.3, spec-4568-55600-0440) ανάλυσης των BALs Si IV και C IV στις συνιστώσες απορρόφησης από τις οποίες αποτελούνται. Στην ίδια εικόνα παρουσιάζεται επίσης και η ανάλυση των αντίστοιχων BELs.

Στην Εικόνα 6.2 παρουσιάζονται τα best fit των πλατιών γραμμών εκπομπής και απορρόφησης των Si IV και C IV για τους 20 BALQSOs. Η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει το παρατηρούμενο φάσμα και η παχιά μαύρη γραμμή την καλύτερη δυνατή προσαρμογή (best fit). Κάτω από κάθε best fit, με πράσινο χρώμα, δίνεται η απόκλιση του fit από το παρατηρούμενο φάσμα (residual).

Στον πίνακα 6.1 δίνονται τα $x_{reduced}^2$ των πλατιών κοιλάδων απορρόφησης (BALs) των Si IV και C IV των 20 BALQSOs. Στην περίπτωση των 10 BALQSOs στους οποίους μελετάται η μεταβλητότητα των BALs Si IV και C IV δίνεται το $x_{reduced}^2$ και για τις δύο εποχές. Οι τιμές των παραμέτρων (V_{rad} , FWHM, τ₀, EW) των συνιστωσών απορρόφησης που υπολογίζονται μέσα από τις προσομοιώσεις δίνονται στους Πίνακες 6.2 - 6.9 στο Παράρτημα.

Στην Εικόνα 6.3 καταδεικνύεται η πιστή εφαρμογή των κριτηρίων που λαμβάνει χώρα κατά την προσομοίωση των πλατιών κοιλάδων απορρόφησης των Si IV και C IV. Στα γραφήματα (a-f) μπορεί κανείς να διαπιστώσει πως πληρούνται τα κριτήρια 1 (α-γ) και 2 (α-β) (βλέπε § 4.3.4). Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 6.3 καταδεικνύεται ότι για κάθε BALQSO ισχύει ότι: α) ο αριθμός των μπλε και κόκκινων συνιστωσών μιας διπλέτας συντονισμού είναι ακριβώς ο ίδιος. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε λ 1548.187 Å (μπλε) συνιστώσα του C IV αντιστοιχεί μία λ 1550.772 Å (κόκκινη) συνιστώσα. Το ίδιο ισχύει και για το Si IV [διαγράμματα 6.3(a), 6.3(b)], β) Κάθε μπλε συνιστώσα του C IV σε συγκεκριμένη ταχύτητα έχει την αντίστοιχη κόκκινη συνιστώσα, στην ίδια ακτινική ταχύτητα. Το ίδιο ισχύει και στο Si IV [διαγράμματα 6.3(a), 6.3(b)], γ) Η μπλε συνιστώσα του C IV και η κόκκινη συνιστώσα του C IV στην ίδια ακτινική ταχύτητα, έχουν ακριβώς το ίδιο εύρος (FWHM). Το ίδιο ισχύει και για το Si IV [διαγράμματα 6.3(e), 6.3(f)], δ) οι BALs των C IV και Si IV αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών [διαγράμματα 6.3(c), 6.3(d)], ε) Κάθε μπλε συνιστώσα του C IV σε συγκεκριμένη ακτινική ταχύτητα έχει την αντίστοιχη μπλε συνιστώσα του Si IV στην ίδια ακτινική ταχύτητα. Το ίδιο ισχύει μεταξύ των κόκκινων συνιστωσών του C IV και του Si IV [διαγράμματα 6.3(c), 6.3(d)].



Εικόνα 6.1. Προσομοίωση των πλατιών κοιλάδων απορρόφησης των Si IV και C IV στα φάσματα των J155335.78+324308.1 (Εικόνες a, b) και J101056.69+355833.3 (Εικόνες c, d). Η μαύρη εστιγμένη γραμμή αντιστοιχεί στο παρατηρούμενο φάσμα, η μαύρη παχιά γραμμή στο τελική καλύτερη προσαρμογή (best fit), η μπλε λεπτή γραμμή αντιστοιχεί στις συνιστώσες μικρότερου μήκους κύματος (μπλε συνιστώσες: λ 1393.755 Å για το Si IV και λ 1548.187 Å για τον C IV) της εκάστοτε διπλέτας, οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις συνιστώσες μεγαλύτερου μήκους κύματος (κόκκινες συνιστώσες: λ 1402.77 Å για το Si IV και λ 1550.772 Å για τον C IV) της εκάστοτε διπλέτας. Τέλος, με πράσινο χρώμα αποδίδεται η απόκλιση της προσαρμογής από το παρατηρούμενο φάσμα (residual). Για κάθε fit παρέχεται το ελαχιστοποιημένο x^2 ($x^2_{reduced}$).



Εικόνα 6.1. Συνέχεια





Εικόνα 6.1. Συνέχεια



Εικόνα 6.2. Προσομοιώσεις των πλατιών κοιλάδων απορρόφησης (BALs) των ιόντων Si IV και C IV, στα φάσματα των 20 BALQSOs.



Εικόνα 6.2. Συνέχεια



Εικόνα 6.2. Συνέχεια



Εικόνα 6.2. Συνέχεια



Εικόνα 6.2. Συνέχεια



Εικόνα 6.2. Συνέχεια



Εικόνα 6.2. Συνέχεια



Εικόνα 6.2. Συνέχεια

Πίνακας 6.1. Στον πίνακα παρέχονται τα ελαχιστοποιημένα x^2 ($x^2_{reduced}$) για τις προσομοιώσεις των πλατιών κοιλάδων απορρόφησης των Si IV και C IV για κάθε BALQSO, που καταδεικνύουν την ορθότητα των προσομοιώσεων. Στην δεύτερη στήλη δίνεται το όνομα του κάθε BALQSO και σε παρένθεση τα στοιχεία των Plate, MJD (Modified Julian Date), fiber.

#	SDSS Name	x ² _{reduced} (Si IV)	x ² _{reduced} (C IV)
1	J114548.38+393746.6	1.028	1.870
	(spec-1997-53442-450)		
	J114548.38+393746.6	1.202	1.886
	(spec-4654-55659-856)		
2	J101056.69+355833.3	1.718	1.852
2	(spec-1951-53389-0579)		
	J101056.69+355833.3	1.054	1.175
	(spec-568-55600-0440)		
2	J114704.46+153243.3	1.536	1.957
З	(spec-1761-53376-0574)		
	J114704.46+153243.3	1.680	1.998
	(spec-5383-56013-0492)		
4	J155335.78+324308.1	1.286	1.957
	(spec-1403-53227-0075)		

	J155335.78+324308.1	1 761	1.998
	(spec-4966-55712-0266)	1./01	
-	J003135.57+003421.2	1 0 2 1	1.934
5	(spec-0689-52262-0502)	1.021	
	J003135.57+003421.2	1 0/6	2.020
	(spec-3587-55182-0570)	1.040	2.030
(J023252.80-001351.1	1546	2.002
0	(spec-3615-55179-0030)	1.540	
	J023252.80-001351.1	1.380	1.958
	(spec-4239-55458-0398)		
7	J085746.61+513444.4	1.098	1.520
/	(spec-0551-51993-0519)		
	J085746.61+513444.4	1.848	1.898
	(spec-7304-56745-0584)		
0	J112742.98+022441.8	1.127	1.114
0	(spec-0512-51992-0520)		
	J112742.98+022441.8	1 560	1 188
	(spec-4730-55630-0818)	1.500	1.100
a	J113527.25+385744.1	1.686	1.972
,	(spec-1972-53466-0263)		
	J113527.25+385744.1	1 915	1 389
	(spec-4648-55673-0830)	1.715	1.009
10	J091307.83+442014.3	1.999	1.933
10	(spec-832-52312-195)		
	J091307.83+442014.3	2.005	1.905
	(spec-4687-56369-0700)	2.000	1,700
11	J151601.51+430931.4	1.732	2.003
11	(spec-6048-56072-0147)	1	
12	J023908.98-002121.3	1.957	1.994
	(spec-4240-55455-0434)		
13	J015921.53+141043.1	1.360	1.951
10	(spec-0427-51900-0383)		
14	J004527.68+143816.1	1.049	1.099
	(spec-0419-51879-0104)		
15	J005419.99+002727.9	1.774	1.718
10	(spec-0394-51913-0511)		
16	J062012.88+833206.9	1.982	2.001
	(spec-2548-54152-0557)		
17	J223841.89+142154.9	1.471	2.002
	(spec-1893-53239-0379)		
18	J022844.09+000217.0	1.687	1,968
10	(spec-3615-55208-0780)		
19	J141546.24+112943.4	1.471 2.002 1.687 1.968 1.939 2.001 1.898 1.922	2.001
	(spec-1705-53848-0590)		
20	J135559.03-002413.6	1.021 1.846 1.546 1.380 1.098 1.098 1.098 1.848 1.127 1.560 1.560 1.686 1.915 1.915 1.999 2.005 1.732 1.999 2.005 1.732 1.957 1.360 1.732 1.957 1.360 1.049 1.774 1.982 1.982 1.471 1.687 1.939 1.898	1.922
20	(spec-4037-55631-0486)		



Εικόνα 6.3. Στην εν λόγω εικόνα είναι εμφανές ότι για την προσομοίωση των πλατιών κοιλάδων απορρόφησης των Si IV και C IV στους 20 BALQSOs, έχουν εφαρμοστεί με συνέπεια τα κριτήρια τα οποία εξασφαλίζουν την μοναδικότητα της τελικής προσομοίωσης. Στα γραφήματα (a-f) μπορεί κανείς να διαπιστώσει πως πληρούνται τα κριτήρια 1 (α-γ) και 2 (α-β). Πιο συγκεκριμένα στην εικόνα δίνονται, για τους 20 BALQSOs: (a) Ακτινική ταχύτητα των κόκκινων συνιστωσών απορρόφησης του Si IV συναρτήσει της ακτινικής ταχύτητας των μπλε συνιστωσών του Si IV. Στο διάγραμμα είναι εμφανές ότι για κάθε διπλέτα Si IV ισχύει $V_{rad}(SiIV_{blue}) = V_{rad}(SiIV_{red})$. (b) Ακτινική ταχύτητα των κόκκινων συνιστωσών του C IV συναρτήσει της ακτινικής ταχύτητας των μπλε συνιστωσών του C IV. Στο διάγραμμα είναι εμφανές ότι για κάθε διπλέτα C IV ισχύει $V_{rad}(CIV_{blue}) = V_{rad}(CIV_{red})$. (c) Ακτινική ταχύτητα των μπλε συνιστωσών του Si IV συναρτήσει της ακτινικής ταχύτητας των μπλε συνιστωσών του C IV. Στο διάγραμμα είναι εμφανές ότι κάθε μπλε συνιστώσα του C IV σε συγκεκριμένη ακτινική ταχύτητα έχει την αντίστοιχη μπλε συνιστώσα του Si IV στην ίδια ακτινική ταχύτητα $V_{rad}(CIV_{blue}) = V_{rad}(SiIV_{blue})$. (d) Ακτινική ταχύτητα των κόκκινων συνιστωσών του Si IV συναρτήσει της ακτινικής ταχύτητας των κόκκινων συνιστωσών του C IV. Στο διάγραμμα είναι εμφανές ότι κάθε κόκκινη συνιστώσα του C IV σε συγκεκριμένη ακτινική ταχύτητα έχει την αντίστοιχη κόκκινη συνιστώσα του Si IV στην ίδια ακτινική ταχύτητα $V_{rad}(CIV_{red}) = V_{rad}(SiIV_{red})$. (e) FWHM των κόκκινων συνιστωσών του Si IV συναρτήσει των FWHM των μπλε συνιστωσών του Si IV, (f) FWHM των κόκκινων συνιστωσών του C IV συναρτήσει των FWHM των μπλε συνιστωσών του C IV. Από τα διαγράμματα (e, f) είναι εμφανές ότι οι μπλε και κόκκινη συνιστώσα κάθε διπλέτας συντονισμού έχουν το ίδιο FWHM.

Τα υπολογιζόμενα εύρη (FWHM) των συνιστωσών απορρόφησης των BALs των Si IV και C IV κυμαίνονται μεταξύ 270 (km/s) ≤ FWHM_{SiIV} ≤ 2020 (km/s) και μεταξύ 280 (km/s) ≤ FWHM_{CIV} ≤ 2730 (km/s) αντίστοιχα. Σημειώνεται πως η θερμοκρασία της BAL περιοχής κυμαίνεται μεταξύ $10^4 - 10^5$ K. Στην περίπτωση του Si IV το θερμικό εύρος για T=10⁴ K αντιστοιχεί σε FWHM~4 km/s και FWHM~12 km/s για T=10⁵ K. Στην περίπτωση του C IV για T = 10⁴ K είναι FWHM~6 km/s ενώ για T = 10⁵ K είναι FWHM~20 km/s. Συνεπώς, τα εύρη των συνιστωσών στα οποία έχουν αναλυθεί οι BALs των Si IV και C IV είναι κατά πολύ μεγαλύτερα από τα θερμικά εύρη για ένα αέριο θερμοκρασίας $10^4 - 10^5$ K.

Στην Εικόνα 6.4 παρουσιάζεται το εύρος (FWHM) των συνιστωσών απορρόφησης των Si IV και C IV συναρτήσει της ακτινικής ταχύτητας των συνιστωσών, για τους 20 BALQSOs. Σημειώνεται ότι το FWHM μεταξύ μπλε και κόκκινης συνιστώσας μιας διπλέτας του C IV (ή του Si IV) είναι το ίδιο. Για το λόγο αυτό δεν δίνονται ξεχωριστά διαγράμματα για τις μπλε και κόκκινες συνιστώσες. Κάνοντας έναν μη παραμετρικό έλεγχο Spearman²³ καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική που σημαίνει ότι οι συνιστώσες απορρόφησης τόσο του C IV όσο και του Si ΙV έχουν μεγαλύτερα FWHM στις μεγάλες ταχύτητες (όσο αυξάνεται η ταχύτητα απομάκρυνσης τόσο αυξάνεται και το εύρος των συνιστωσών απορρόφησης). Τα αποτελέσματα του ελέγχου είναι: α) για το Si IV, R = 0.13238 και η τιμή του ελέγχου διπλής ουράς P = 0.03961. Η συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών σε επίπεδο σημαντικότητας 0.05 θεωρείται στατιστικά σημαντική, β) για τον C IV, R = 0.18006 και η τιμή του ελέγχου διπλής ουράς P = 0.00496. Η συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών σε επίπεδο σημαντικότητας 0.05 θεωρείται στατιστικά σημαντική. Όλα τα προηγούμενα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στο μελετώμενο δείγμα γαλαξιών εμφανίζεται μια τάση αύξησης του εύρους των συνιστωσών αυξανομένης της ταχύτητας απομάκρυνσης.



Εικόνα 6.4. Στην εικόνα παρουσιάζεται για τους 20 BALQSOs η συμπεριφορά των FWHM των συνιστωσών απορρόφησης των Si IV και C IV συναρτήσει της ταχύτητας απομάκρυνσης. (a): FWHM των συνιστωσών απορρόφησης του Si IV συναρτήσει της ταχύτητας απομάκρυνσης των συνιστωσών από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής. (b): FWHM των συνιστωσών απορρόφησης του C IV συναρτήσει της ταχύτητας απομάκρυνσης των συνιστωσών από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής. Τα διαγράμματα καταδεικνύουν την τάση της αύξησης του εύρους των συνιστωσών αυξανομένης της ταχύτητας απομάκρυνσης.

²³ Στη στατιστική, ο συντελεστής συσχέτισης Spearman, είναι ένα μη-παραμετρικό μέτρο της στατιστικής εξάρτησης μεταξύ δύο μεταβλητών. Αξιολογεί το πόσο καλά μπορεί να περιγραφεί η σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών αριοποιώντας μια μονότονη συνάρτηση. Εάν δεν υπάρχουν επαναλαμβανόμενες τιμές των δεδομένων, μια τέλεια συσχέτιση Spearman κατά +1 ή -1 συμβαίνει όταν κάθε μία από τις μεταβλητές είναι μια τέλεια μονότονη συνάρτηση της άλλης. Ο συντελεστής Spearman, όπως κάθε συντελεστής συσχέτισης, είναι κατάλληλος και για συνεχείς και για διακριτές μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένων των τακτικών διακριτών μεταβλητών.

Στην Εικόνα 6.5 παρουσιάζεται η συμπεριφορά των οπτικών βαθών των μπλε και κόκκινων συνιστωσών απορρόφησης, των Si IV και C IV αντίστοιχα, συναρτήσει της ακτινικής ταχύτητας μετατόπισης των συνιστωσών. Τα διαγράμματα και ο έλεγχος Spearman καταδεικνύουν ότι οι συνιστώσες που βρίσκονται στις μεγαλύτερες ακτινικές ταχύτητες χαρακτηρίζονται από μικρότερα οπτικά βάθη. Τα αποτελέσματα του ελέγχου είναι: α) για τις μπλε συνιστώσες του Si IV είναι R = 0.18743 και P = 0.0033 συνεπώς η συσχέτιση σε επίπεδό σημαντικότητας 0.05 θεωρείται σημαντική, β) για τις κόκκινες συνιστώσες του Si IV είναι R = 0.19173 και P = 0.00263 συνεπώς η συσχέτιση σε επίπεδό σημαντικότητας 0.05 θεωρείται σημαντική, γ) για τις μπλε συνιστώσες του C IV, R = 0.32595 και P = 0 συνεπώς η συσχέτιση σε επίπεδό σημαντικότητας 0.05 θεωρείται σημαντική, δ) για τις κόκκινες συνιστώσες του C IV είναι R = 0.31596 και P = 0, συνεπώς η συσχέτιση σε επίπεδό σημαντικότητας 0.05 θεωρείται σημαντική. Το γεγονός ότι οι απορροφήσεις είναι ασθενέστερες στις μεγάλες ταχύτητες απομάκρυνσης είναι σε συμφωνία με τα ευρήματα των Korista et al. (1993) και Capellupo et al. (2011). Τα διαγράμματα καταδεικνύουν την τάση της μείωσης του οπτικού βάθους των συνιστωσών αυξανομένης της ταχύτητας απομάκρυνσης.



Εικόνα 6.5. Οπτικά βάθη (στο κέντρο της γραμμής) των συνιστωσών των Si IV και C IV, συναρτήσει της ακτινικής ταχύτητας απομάκρυνσης από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής, για τους 20 BALQSOs. (a) Οπτικό βάθος των μπλε συνιστωσών απορρόφησης του Si IV, συναρτήσει της ακτινικής ταχύτητας, (b) οπτικό βάθος των κόκκινων συνιστωσών απορρόφησης του Si IV, συναρτήσει της ακτινικής ταχύτητας, (c) οπτικό βάθος των μπλε συνιστωσών απορρόφησης του Si IV, συναρτήσει της ακτινικής ταχύτητας, (c) οπτικό βάθος των μπλε συνιστωσών απορρόφησης του Si IV, συναρτήσει της ακτινικής ταχύτητας, (d) οπτικό βάθος των μπλε συνιστωσών απορρόφησης του C IV, συναρτήσει της ακτινικής ταχύτητας, (d) οπτικό βάθος των κόκκινων συνιστωσών απορρόφησης του C IV, συναρτήσει της ακτινικής ταχύτητας. Τα διαγράμματα καταδεικνύουν την τάση της μείωσης του οπτικού βάθους των συνιστωσών αυξανομένης της ταχύτητας απομάκρυνσης.

Στην Εικόνα 6.6(a, b) παρουσιάζονται οι συσχετίσεις μεταξύ των οπτικών βαθών (τ_0) , των FWHM και των ταχυτήτων των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του Si IV και

του C IV αντιστοίχως, για τους 20 BALQSOs. Στα διαγράμματα, είναι εμφανές ότι οι BAL περιοχές των Si IV και C IV δεν συνιστούν περιοχές ανάπτυξης ομαλού και ομοιογενούς ανέμου αλλά περιοχές ανάπτυξης ανομοιογενειών (νεφών) εντός του ανέμου. Επειδή όμως τα νέφη απορρόφησης περιέχουν τόσο ιόντα Si IV όσο και C IV, στην Εικόνα 6.6(c) παρουσιάζονται οι περιοχές πυκνότητας των συνιστωσών απορρόφησης και του Si IV και του C IV.



Εικόνα 6.6. Συσχέτιση μεταξύ οπτικών βαθών (τ₀), FWHM και Vrad για τις συνιστώσες απορρόφησης του Si IV (a) και του C IV (b) αλλά και για τα δύο ιόντα συγχρόνως καθώς ανήκουν στα ίδια νέφη. Οι συνιστώσες που βρίσκονται στις μικρές ακτινικές ταχύτητες (πιο κοντά στην εκπομπή) χαρακτηρίζονται από μεγάλα οπτικά βάθη και μικρά FWHM. Όσο μεγαλώνουν οι ακτινικές ταχύτητες των συνιστωσών (νεφών) μικραίνουν τα οπτικά βάθη και μεγαλώνουν τα FWHM. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται τόσο στο Si IV όσο και στον C IV.



Εικόνα 6.6. Συνέχεια

Στην Εικόνα 6.6(c) είναι εμφανές ότι μειούμενης της ταχύτητας απομάκρυνσης, δηλαδή όταν οι συνιστώσες απορρόφησης βρίσκονται πιο κοντά στην BEL, χαρακτηρίζονται από μικρότερα FWHM αλλά μεγαλύτερα οπτικά βάθη. Από τις εικόνες αυτές, όπως θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 7, οδηγούμαστε σε μια επέκταση του φυσικού μοντέλου δομής του περιβάλλοντος της εκροής των quasars. Η εκροή πιο κοντά στο δίσκο χαρακτηρίζεται από έντονη ανομοιογένεια, αποτελούμενη από νέφη μεγαλύτερης πυκνότητας άρα και μεγαλύτερου οπτικού βάθους (έντονη clumping structure). Καθώς η ροή επιταχύνεται ακτινικά, η πυκνότητα των νεφών μειώνεται αυξανομένης της ταχύτητας και η εκροή τείνει να εξελιχθεί σε ομαλό άνεμο στις μεγάλες ακτινικές ταχύτητες απομάκρυνσης. Επειδή ο clumping wind επεκτεινόμενος τείνει να εξελιχθεί σε ομαλό άνεμο σημαίνει ότι οι συνιστώσες απορρόφησης που αντιστοιχούν σε νέφη θα πρέπει στις μεγάλες ταχύτητες να αποκτούν μικρά οπτικά βάθη και μεγάλα FWHM μέχρι του σημείου που οι συνιστώσες αυτές λόγω μικρού βάθους και μεγάλης έκτασης ουσιαστικά και πρακτικά να εξαφανίζονται εφόσον δεν θα μπορούν να διακριθούν μέσα στο θόρυβο του συνεχούς. Όλα τα προηγούμενα, τα οποία έχουν προκύψει μέσω των μετρήσεων είναι συνεπή και επιβεβαιώνουν μια σειρά δημοσιευμένων επιστημονικών απόψεων (βλέπε Κεφάλαιο 7, Συζήτηση).

6.1.1. Σύγκριση των παραμέτρων των συνιστωσών Si IV και C IV, που βρίσκονται στην ίδια V_{rad} από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής.

Στην Εικόνα 6.7(a) δίνεται η σύγκριση των FWHM των συνιστωσών του Si IV με το FWHM των αντίστοιχων συνιστωσών του C IV που βρίσκονται στις ίδιες ακτινικές ταχύτητες, για τους 20 BALOSOs. Πιο συγκεκριμένα, κάθε σημείο του διαγράμματος παρουσιάζει τη συσχέτιση των FWHM των συνιστωσών του Si IV και C IV, του αυτού quasar, οι οποίες παρουσιάζουν την ίδια ακτινική ταχύτητα. Η κόκκινη γραμμή δίνει την γραμμική παρεμβολή των σημείων του γραφήματος με εξίσωση y = 0.67x + 61.8 η οποία έχει $R^2 = 0.90383$, συντελεστή συσχέτισης Pearson²⁴ R = 0.9509 και P = 0.00001που σημαίνει ότι η γραμμική συσχέτιση είναι σημαντική στο επίπεδο 0.01. Η μαύρη γραμμή δείχνει τη γραμμική παρεμβολή αν οι συνιστώσες Si IV και C IV παρουσίαζαν το ίδιο FWHM. Μετά τα προηγούμενα είναι εμφανές ότι εφόσον όλα τα σημεία βρίσκονται κάτω από την μαύρη γραμμή τότε όλες οι συνιστώσες του C IV έχουν εύρος μεγαλύτερο από τις αντίστοιχες συνιστώσες του Si IV στην ίδια ακτινική ταχύτητα. Παρατηρείται ένας μικρός αριθμός συνιστωσών Si IV οι οποίες έχουν FWHM ίσο με των αντίστοιχων συνιστωσών του C IV στην ίδια ακτινική ταχύτητα. Παρατηρούνται επίσης 4 συνιστώσες Si IV που στην αντίστοιχη ακτινική ταχύτητα έχουν συνιστώσες C IV με μικρότερο FWHM αλλά αυτό το αποτέλεσμα βρίσκεται εντός των ορίων του σφάλματος μέτρησης.

Το γεγονός ότι οι συνιστώσες του C IV παρουσιάζουν μεγαλύτερο FWHM από τις αντίστοιχες συνιστώσες του Si IV, του αυτού quasar και της ίδιας ταχύτητα, ήταν αναμενόμενο, εφόσον το θερμικό εύρος του C IV είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του Si IV (βλέπε § 3.3, 3.4). Το γεγονός ότι το αποτέλεσμα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνεται από την φυσική θεωρία καταδεικνύει την ορθότητα των προσομοιώσεων και την ακρίβεια των υπολογιζόμενων τιμών των παραμέτρων.

Στην Εικόνα 6.7(b) κάθε σημείο του διαγράμματος αντιστοιχεί στο λόγο < FWHM_{CIV}/FWHM_{SiIV} > όπου τα δυο FWHM αντιστοιχούν στον αυτό quasar και σε συνιστώσες των Si IV και C IV που παρουσιάζουν την ίδια ακτινική ταχύτητα. Όπως παρατηρούμε, οι λόγοι αυτοί, για διαφορετικές ταχύτητες, παρουσιάζουν μέση τιμή 1.37±0.22. Το σφάλμα σε σχέση με την μετρούμενη μέση τιμή είναι της τάξης του 16% (coefficient of variation = 0.16). Αυτό σημαίνει ότι για κάθε μελλοντική προσομοίωση των Si IV και C IV, στους BALQSOs, οι τιμές αυτές αποτελούν κριτήριο ορθής προσομοίωσης των Si IV και C IV καθώς επίσης και του ορθού υπολογισμού των τιμών των FWHM των Si IV και C IV.

Στην Εικόνα 6.8 παρουσιάζεται, για τους 20 BALQSOs, η σύγκριση των οπτικών βαθών (στο κέντρο της γραμμής) των μπλε συνιστωσών του C IV και των μπλε συνιστωσών του Si IV, που στον αυτό quasar βρίσκονται στην ίδια ακτινική ταχύτητα

²⁴ Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson R αποτελεί ένα μέτρο της ισχύος της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ δύο παραμέτρων. Ο συντελεστής R παίρνει τιμές στο εύρος [-1, 1] όπου R = -1 σημαίνει τέλεια αρνητική γραμμική συσχέτιση, R = 1 σημαίνει τέλεια θετική γραμμική συσχέτιση ενώ R = 0 σημαίνει ότι δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Η τιμή P αποτελεί ένα μέτρο του επίπεδου σημαντικότητας μιας στατιστικής υπόθεσης. Χρησιμοποιείται στον έλεγχο υποθέσεων ώστε να καθοριστεί το αν θα απορριφθεί ή όχι η μηδενική υπόθεση. Γενικά η μηδενική υπόθεση διατυπώνεται με σκοπό να αμφισβητηθεί. Συνεπώς το συμπλήρωμα (αντίθετο) του συμπεράσματος στο οποίο θέλει να φθάσει ο ερευνητής, γίνεται μηδενική υπόθεση.

μετατόπισης από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής. Όμοια, δίνεται και η σύγκριση των οπτικών βαθών των κόκκινων συνιστωσών. Από τις συνολικά 241 συνιστώσες C IV_{blue} και Si IV_{blue}, που βρίσκονται στις ίδιες ακτινικές ταχύτητες μετατόπισης από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής, το ~66% (160/241) των συνιστωσών C IV_{blue} έχει μεγαλύτερο οπτικό βάθος από τις συνιστώσες Si IV_{blue}. Από τις συνολικά 241 συνιστώσες CIV_{red} και Si IV_{red}, που βρίσκονται στις όλιες ακτινικές ταχύτητες μετατόπισης από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής, το ~66% (160/241) των συνιστωσών C IV_{red} και Si IV_{red}, που βρίσκονται στις ίδιες ακτινικές ταχύτητες μετατόπισης από τις συνιστώσες CIV_{red} και Si IV_{red}, που βρίσκονται στις ίδιες ακτινικές ταχύτητες μετατόπισης από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής, το ~69% (166/241) των συνιστωσών C IV_{red} έχει μεγαλύτερο οπτικό βάθος από τις συνιστώσες Si IV_{red}.



Εικόνα 6.7. (a) Κάθε σημείο του διαγράμματος παρουσιάζει τη συσχέτιση των FWHM των συνιστωσών του Si IV και C IV, του αυτού quasar, οι οποίες παρουσιάζουν την ίδια ακτινική ταχύτητα, (b) κάθε σημείο του διαγράμματος αντιστοιχεί στο λόγο < FWHM_{CIV}/FWHM_{SiIV} > όπου τα δυο FWHM αντιστοιχούν στον αυτό quasar και σε συνιστώσες των Si IV και C IV που παρουσιάζουν την ίδια ακτινική ταχύτητα.

Στην Εικόνα 6.9 παρουσιάζεται ο λόγος των οπτικών βαθών μεταξύ των γραμμών συντονισμού της διπλέτας του Si IV συναρτήσει του λόγου οπτικών βαθών μεταξύ των γραμμών συντονισμού της διπλέτας του C IV. Κάθε σημείο του διαγράμματος παρουσιάζει τη συσχέτιση συνιστωσών του Si IV και C IV, του αυτού quasar, οι οποίες παρουσιάζουν την ίδια ακτινική ταχύτητα. Με βάση την ατομική φυσική είναι γνωστό ότι ο λόγος των οπτικών βαθών μεταξύ των γραμμών συντονισμού της διπλέτας του C IV είναι: $\tau_{1548}/\tau_{1551} \approx 2/1$ και του Si IV είναι

 $τ_{1393}/τ_{1402} ≈ 2/1$ (Savage & Sembach 1991, Verner et al. 1994). Θα έπρεπε δηλαδή όλες οι τιμές στο διάγραμμα να είναι συγκεντρωμένες στο σημείο (A) γεγονός το οποίο δεν συμβαίνει. Η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή καταδεικνύει εκείνες τις διπλέτες του Si IV των οποίων οι συνιστώσες έχουν τον θεωρητικό λόγο οπτικών βαθών $τ_b/τ_r = 2$ ενώ οι αντίστοιχες του C IV στην ίδια ταχύτητα έχουν τιμές μεταξύ 1 και 2. Αντίστοιχα, η κάθετη διακεκομμένη γραμμή καταδεικνύει εκείνες τις διπλέτες του C IV των οποίων οι συνιστώσες έχουν τον θεωρητικό λόγο οπτικών βαθών $τ_b/τ_r = 2$ ενώ οι αντίστοιχες συνιστώσες του Si IV, στην ίδια ταχύτητα έχουν τιμές του λόγου μεταξύ 1 και 2. Η κόκκινη συνεχής γραμμή είναι ο γεωμετρικός τόπος εκείνων των σημείων που αντιπροσωπεύουν λόγους ιδίων τιμών $τ_b/τ_r$ (Si IV) = $τ_b/τ_r$ (C IV) οι οποίες τιμές κυμαίνονται μεταξύ 1 και 2 και δεν είναι 2 όπως προβλέπει η ατομική φυσική.



Εικόνα 6.8. (a): Σύγκριση των οπτικών βαθών (στο κέντρο της γραμμής) των μπλε συνιστωσών του C IV και των μπλε συνιστωσών του Si IV, που βρίσκονται στην ίδια ακτινική ταχύτητα μετατόπισης από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής, για τους 20 BALQSOs. (b): Σύγκριση των οπτικών βαθών (στο κέντρο της γραμμής) των κόκκινων συνιστωσών του C IV με και των κόκκινων συνιστωσών του Si IV, που βρίσκονται στην ίδια ακτινική ταχύτητα μετατόπισης από την αντίστοιχη γραμμής) των κόκκινων συνιστωσών του C IV με και των κόκκινων συνιστωσών του Si IV, που βρίσκονται στην ίδια ακτινική ταχύτητα μετατόπισης από την αντίστοιχη γραμμής) των κόκκινων συνιστωσών του C IV με και των κόκκινων συνιστωσών του Si IV, που βρίσκονται στην ίδια ακτινική ταχύτητα μετατόπισης από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής, για τους 20 BALQSOs. Οι εικόνες καταδεικνύουν ότι σε ποσοστό ~66.5% οι συνιστώσες του C IV είναι βαθύτερες από τις αντίστοιχες συνιστώσες του Si IV στις ίδιες ακτινικές ταχύτητες.

Όπως είναι εμφανές από το διάγραμμα οι λόγοι παρουσιάζουν τιμές μεταξύ του 2 και του 1. Το γεγονός αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από το φαινόμενο της μερικής κάλυψης των νεφών και του γεγονότος ότι τα ιόντα Si IV και C IV δεν είναι ισοκατανεμημένα εντός των νεφών. Δεδομένου λοιπόν, ότι μέσα σε ένα νέφος, δεν είναι ισοκατανεμημένοι οι απορροφητές Si IV και C IV, κάθε κίνηση του νέφους εντός της γραμμής παρατήρησης, θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή μείωση των απορροφητών του ενός ιόντος σε βάρος του άλλου, λόγω μεταβολών στην γεωμετρική κάλυψη. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να αυξομειώνεται τεχνητά ο λόγος των οπτικών βαθών μεταξύ των συνιστωσών μιας διπλέτας αλλά και μεταξύ διπλετών Si IV και C IV που βρίσκονται στην ίδια ταχύτητα. Όλα τα προηγούμενα όμως είναι απόδειξη της ύπαρξης νεφών, καθώς αν οι BALs ήταν το προϊόν ομαλού και ομοιογενούς ανέμου τότε δεν θα εμφανιζόντουσαν αυτές οι αποκλίσεις.

Στην Εικόνα 6.10 παρουσιάζεται για τους 20 BALQSOs, η σύγκριση των ισοδύναμων ευρών των συνιστωσών του Si IV συναρτήσει του ισοδύναμου εύρος των συνιστωσών του C IV για όλες τις συνιστώσες που βρίσκονται στην ίδια ακτινική ταχύτητα από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής. Οι συγκρίσεις γίνονται μεταξύ μπλε συνιστωσών Si IV και

C IV και μεταξύ κόκκινων συνιστωσών Si IV και C IV. Από τις συνολικά 241 μπλε συνιστώσες Si IV και C IV που βρίσκονται στις ίδιες ταχύτητες απομάκρυνσης, οι 193 (~80%) συνιστώσες του C IV χαρακτηρίζονται από $EW(CIV_{blue}) > EW(SiIV_{blue})$. Από τις 241 κόκκινες συνιστώσες Si IV και C IV που βρίσκονται στις ίδιες ταχύτητες απομάκρυνσης, οι 192 (~80%) συνιστώσες του C IV χαρακτηρίζονται από $EW(CIV_{red}) > EW(SiIV_{red})$.



Εικόνα 6.9. Λόγος των οπτικών βαθών μεταξύ των γραμμών συντονισμού της διπλέτας του Si IV συναρτήσει του λόγου οπτικών βαθών μεταξύ των γραμμών συντονισμού της διπλέτας του C IV. Κάθε σημείο του διαγράμματος παρουσιάζει τη συσχέτιση συνιστωσών του Si IV και C IV, του αυτού quasar, οι οποίες βρίσκονται στην ίδια ακτινική ταχύτητα. Το εν λόγω διάγραμμα καταδεικνύει ότι οι λόγοι οπτικών βαθών $τ_b/τ_r$ (Si IV) και $τ_b/\tau_r$ (C IV), στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων αποκλίνουν από την θεωρητικά αναμενόμενη τιμή ($τ_{blue}/τ_{red} = 2$, βλέπε § 3.3, 3.4) γεγονός που καταδείκνυε την μερική κάλυψη της πηγής του συνεχούς από τα νέφη απορρόφησης (βλέπε § 2.3).



Εικόνα 6.10. Αριστερά: Ισοδύναμο εύρος των μπλε συνιστωσών του Si IV συναρτήσει του ισοδύναμου εύρους των μπλε συνιστωσών του C IV που βρίσκονται στις ίδιες ακτινικές ταχύτητες από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής, για τους 20 BALQSOs. Δεξιά: Ισοδύναμο εύρος των κόκκινων συνιστωσών του Si IV συναρτήσει του ισοδύναμου εύρους των κόκκινων συνιστωσών του C IV που βρίσκονται στις ίδιες ακτινικές ταχύτητες από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής. για τους 20 BALQSOs. Δεξιά: Ισοδύναμο εύρος των κόκκινων συνιστωσών του C IV που βρίσκονται στις ίδιες ακτινικές ταχύτητες από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής, για τους 20 BALQSOs. Σε ποσοστό ~78.5% οι συνιστώσες των BALs του C IV εμφανίζουν μεγαλύτερο ισοδύναμο εύρος από τις αντίστοιχες συνιστώσες των BALs Si IV, στις ίδιες ακτινικές ταχύτητες.

6.2. Αποτελέσματα μελέτης μεταβλητότητας στους 10 BALQSOs (Stathopoulos et al. 2019, MNRAS, in press)

Η μελέτη της μεταβλητότητας, των πλατιών κοιλάδων απορρόφησης των quasars, μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες όσον αφορά την εξέλιξη, τη δυναμική, την κινηματική και τις βασικές φυσικές ιδιότητες της εκροής που πηγάζει από το δίσκο προσαύξησης. Όπως αναφέρεται στην § 2.4 η μελέτη της μεταβλητότητας των BALs πραγματοποιείται μέσω δύο μεθόδων οι οποίες εμφανίζουν σοβαρές αδυναμίες με αποτέλεσμα να καθίσταται αναξιόπιστη η εγκυρότητά τους.

Στην εν λόγω μελέτη, σε αντίθεση με τις περισσότερες μελέτες μεταβλητότητας κατά τις οποίες μελετάται η μεταβλητότητα του συνολικού ισοδύναμου εύρους της κοιλάδας απορρόφησης ή η μεταβλητότητα εντός τμημάτων μιας κοιλάδας απορρόφησης (βλέπε § 2.4), εισάγουμε μια διαφορετική αντιμετώπιση.

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο GR (Danezis et al. 2003, 2007, 2009, Lyratzi et al. 2007, 2009), τα κριτήρια προσομοίωσης των Si IV και C IV των Stathopoulos et al. (2015, 2019) και το λογισμικό ASTA (Tzimeas 2019), αναλύουμε τις κοιλάδες απορρόφησης των Si IV και C IV στον μοναδικά καθορισμένο αριθμό συνιστωσών από τις οποίες αποτελούνται. Ως αποτέλεσμα μελετάται η μεταβλητότητα κάθε συνιστώσας απορρόφησης ξεχωριστά δηλαδή μελετάται η μεταβλητότητα των φυσικών παραμέτρων FWHM, οπτικό βάθος και ακτινική ταχύτητα, των νεφών απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης, μεταξύ δύο εποχών (Stathopoulos et al 2017, 2019).

Για να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των γραμμών απορρόφησης των Si IV και C IV στην ίδια ακτινική ταχύτητα, χρησιμοποιούμε τις μπλε συνιστώσες (τις συνιστώσες μικρότερου μήκους κύματος της κάθε διπλέτας, δηλαδή την 1548.187 Å για τον C IV και την 1393.755 Å για το Si IV) ως μέτρο της μηδενικής ταχύτητας στον χώρο των ταχυτήτων. Προκειμένου να καθοριστεί με συνέπεια ποιες συνιστώσες εμφανίζουν μεταβολές ως προς τα οπτικά τους βάθη (τ₀), τις ακτινικές τους ταχύτητες (V_{rad}) και τα εύρη τους (FWHM), μεταξύ των δύο διαφορετικών εποχών, ορίζεται ένα μέτρο της διαφοράς μεταξύ δύο συνιστωσών, σε μονάδες του σ, κάνοντας χρήση της ακόλουθης σχέσης (Filiz Ak et al. 2013):

$$N_{\sigma}(\lambda) = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \tag{6.1}$$

όπου x₁, x₂ είναι είτε τα οπτικά βάθη (στο κέντρο κάθε γραμμής), ή οι ακτινικές ταχύτητες ή τα FWHM των συνιστωσών υπό σύγκριση και σ₁, σ₂ είναι τα αντίστοιχα σφάλματα. Ως μεταβαλλόμενες συνιστώσες θεωρούνται αυτές που εμφανίζουν $|N_{\sigma}| \ge 1$.

6.2.1. Μεταβλητότητα στις ακτινικές ταχύτητες των συνιστωσών

Όπως είναι φανερό τόσο από τον Πίνακα 6.2 όσο και από τα διαγράμματα της Εικόνας 6.11 δεν παρατηρούνται μεταβολές στις ακτινικές ταχύτητες των συνιστωσών μεταξύ των δύο διαφορετικών εποχών. Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 6.11 δίνονται: (a) οι ακτινικές ταχύτητες των μπλε συνιστωσών του C IV (CIV_b: λ 1548.187 Å) της δεύτερης περιόδου συναρτήσει των ακτινικών ταχυτήτων των μπλε συνιστωσών του C IV της πρώτης περιόδου, (b) οι ακτινικές ταχύτητες των ακτινικές ταχύτητες των ακτινικές ταχύτητες των ακτινικές ταχύτητες των ακτινικών ταχυτήτων των μπλε συνιστωσών του C IV (CIV_r: λ 1550.772 Å) της δεύτερης περιόδου συναρτήσει των ακτινικές ταχύτητες των ακτινικών ταχυτήτων των κόκκινων συνιστωσών του C IV της πρώτης περιόδου. Στα διαγράμματα (c) και (d) παρουσιάζονται ότι και στα (a), (b) αλλά για τις για τις μπλε (SiIV_b: λ 1393.772 Å) και κόκκινες (SiIV_r: λ 1402.77 Å) συνιστώσες του Si IV αντίστοιχα.



Εικόνα 6.11. (a) Σύγκριση των ταχυτήτων των μπλε συνιστωσών του C IV (C IV_b: λ 1548.187 Å) μεταξύ των δύο εποχών για τους 10 BALQSOs. (b) Σύγκριση των ταχυτήτων των κόκκινων συνιστωσών του C IV (C IV_r: λ 1550.772 Å) μεταξύ των δύο εποχών για τους 10 BALQSOs. (c) Σύγκριση των ταχυτήτων των μπλε συνιστωσών του Si IV (Si IV_b: λ 1393.755 Å) μεταξύ των δύο εποχών για τους 10 BALQSOs. (d) Σύγκριση των ταχυτήτων συνιστωσών του Si IV (Si IV_r: λ 1402.77 Å) μεταξύ των δύο εποχών για τους 10 BALQSOs. (d) Σύγκριση των ταχυτήτων των κόκκινων συνιστωσών του Si IV (Si IV_r: λ 1402.77 Å) μεταξύ των δύο εποχών για τους 10 BALQSOs Στα διαγράμματα (a)-(d) είναι εμφανές ότι τόσο οι μπλε όσο και οι κόκκινες συνιστώσες απορρόφησης των Si IV και C IV δεν εμφανίζουν μεταβολή της ακτινικής τους ταχύτητας. μεταξύ των δύο εποχών.

Από τα διαγράμματα της Εικόνας 6.11 είναι σαφές ότι οι μπλε και κόκκινες συνιστώσες των C IV και Si IV δεν επιδεικνύουν μεταβολές ως προς τις ακτινικές τους ταχύτητες. Παρόλα αυτά, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στον Πίνακα 6.2 υπάρχουν

συνιστώσες οι οποίες εμφανίζουν μικρές μεταβολές στις ακτινικές τους ταχύτητες. Οι εν λόγω μεταβολές είναι της τάξεως των ~200 – 300 km/s, μία τιμή η οποία είναι εντός του σφάλματος μέτρησης των ακτινικών ταχυτήτων. Για τον λόγο αυτό οι συγκεκριμένες συνιστώσες δεν θεωρούνται ως μεταβαλλόμενες.

6.2.2. Μεταβλητότητα στα εύρη (FWHM) των συνιστωσών

Στην Εικόνα 6.12 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των FWHM (km/s) των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του Si IV και του C IV μεταξύ των δύο εποχών για τους 10 BALQSOs. Πιο συγκεκριμένα στη εικόνα παρουσιάζονται: (a) το FWHM των συνιστωσών C IV_{blue} της δεύτερης περιόδου συναρτήσει του FWHM των συνιστωσών C IV_{blue} της δεύτερης περιόδου, (b) ότι και στο (a) αλλά για τις συνιστώσες C IV_{red}. Στα (c) και (d) δίνονται ότι και στα (a), (b) αλλά για τις συνιστώσες Si IV_{blue} και Si IV_{red} αντίστοιχα. Στην συντριπτική τους πλειοψηφία οι συνιστώσες διατηρούν σταθερό το εύρος τους μεταξύ των δύο εποχών. Στην περίπτωση του C IV παρατηρούνται 5 από 118 (~4%) διπλέτες οι οποίες μεταβάλλουν το εύρος τους μεταξύ των δύο εποχών.



Εικόνα 6.12. (a) Σύγκριση των FWHM των μπλε συνιστωσών του C IV μεταξύ των δύο εποχών για τους 10 BALQSOs, (b) Σύγκριση των FWHM των κόκκινων συνιστωσών του C IV μεταξύ των δύο εποχών για όλους τους BALQSOs, (c) Σύγκριση των FWHM των μπλε συνιστωσών του Si IV μεταξύ των δύο εποχών για τους 10 BALQSOs, (d) Σύγκριση των FWHM των μπλε συνιστωσών του Si IV μεταξύ των δύο εποχών για τους 10 BALQSOs. Στην συντριπτική τους πλειοψηφία οι συνιστώσες διατηρούν σταθερό το εύρος τους μεταξύ των δύο εποχών.

6.2.3. Μεταβλητότητα στα οπτικά βάθη των συνιστωσών

Στον πίνακα 6.10 δίνονται για κάθε BALQSO, στην πρώτη στήλη ο αύξον αριθμός των συνιστωσών από τις οποίες αποτελούνται οι BALs των Si IV και C IV, στην δεύτερη στήλη η ακτινική ταχύτητα της εκάστοτε συνιστώσας, στην τρίτη και τέταρτη στήλη το $N_{\sigma}(\tau_0)$ για την μπλε και κόκκινη συνιστώσα του C IV ενώ στην τέταρτη και πέμπτη στήλη το $N_{\sigma}(\tau_0)$ για την μπλε και κόκκινη συνιστώσα του Si IV. Στον πίνακα σημειώνονται με χρώμα εκείνες οι διπλέτες οι οποίες έχουν υποστεί μεταβολή. Πιο συγκεκριμένα, με κίτρινο χρώμα σημειώνονται οι συνιστώσες για τις οποίες ισχύει $N_{\sigma} \geq 1$ ενώ με πορτοκαλί χρώμα σημειώνονται οι συνιστώσες για τις οποίες ισχύει $N_{\sigma} \leq -1$.

Η μεταβλητότητα των συνιστωσών απορρόφησης εντοπίζεται στο οπτικό βάθος (στο κέντρο της γραμμής), καθώς συνιστώσες του Si IV και του C IV ρηχαίνουν ή βαθαίνουν μεταξύ των δύο εποχών (Εικόνα 6.13). Όπως προαναφέρθηκε, οι συνιστώσες δεν μεταβάλλουν τις ταχύτητές τους ενώ στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων οι συνιστώσες δεν μεταβάλλουν ούτε τα εύρη τους (FWHM) μεταξύ των δύο εποχών. Συνεπώς, οι παρατηρούμενες μεταβολές των προφίλ των BALs οφείλονται στις μεταβολές των οπτικών βαθών μεμονωμένων συνιστωσών.

Στην Εικόνα 6.13 παρουσιάζονται στα επιμέρους διαγράμματα, για κάθε BALQSO, τα οπτικά βάθη τ_{blue}(CIV) [διαγράμματα (I)], τ_{red}(C IV) [διαγράμματα (II)], τ_{blue}(Si IV) [διαγράμματα (II)] και τ_{red}(Si IV) [διαγράμματα (IV)] συναρτήσει της ταχύτητας απομάκρυνσης, για τις δύο διαφορετικές περιόδους. Με μαύρα τετράγωνα σημειώνονται οι συνιστώσες που αντιστοιχούν στα φάσμα της πρώτης περιόδου ενώ με κόκκινο κύκλο οι συνιστώσες του φάσματος της δεύτερης περιόδου. Τα τετράγωνα και οι κύκλοι που δεν είναι γεμισμένα με χρώμα αντιστοιχούν σε εκείνες τις συνιστώσες που έχουν υποστεί μεταβολή στο οπτικό τους βάθους μεταξύ των δύο παρατηρήσεων. Υπενθυμίζεται ότι μεταβαλλόμενες θεωρούνται οι συνιστώσες οι οποίες πληρούν το κριτήριο $|N_{\sigma}| \ge 1$ (βλέπε Εξίσωση 6.1).

Το δείγμα των 10 BALQSOs εμφανίζει συνολικά 118 διπλέτες Si IV και 118 διπλέτες C IV σε αντίστοιχες ταχύτητες απομάκρυνσης. Όπως είναι εμφανές τόσο από τον Πίνακα 6.10 όσο και από τα διαγράμματα της Εικόνας 6.13, οι BALs Si IV και C IV εμφανίζουν μεταβολές στα οπτικά βάθη μεμονωμένων συνιστωσών. Σε κανέναν quasar δεν παρατηρείται BAL Si IV ή C IV η οποία να εμφανίζει μεταβολές σε όλες τις συνιστώσες της, δηλαδή μεταβολή του συνολικού της προφίλ απορρόφησης. Παρατηρούνται τρεις περιπτώσεις (J114548.38+393746.6, J155335.78+324308.1, J023252.80-001351.1) στις οποίες εντός μίας BAL (είτε Si IV είτε C IV) παρατηρείται συντονισμένη μεταβλητότητα μεταξύ των μεταβαλλόμενων συνιστωσών (δηλαδή είτε όλες οι μεταβαλλόμενες συνιστώσες βαθαίνουν είτε όλες ρηχαίνουν). Οι υπόλοιποι επτά quasars επιδεικνύουν μη συντονισμένη μεταβλητότητα μεταξύ των μεταβαλλόμενων συνιστωσών μιας BAL. Επίσης, παρατηρείται μία περίπτωση (J114704.46+153243.3) στην οποία μία ασθενής διπλέτα Si IV και η αντίστοιχή της του C IV, στην ίδια ταχύτητα, εξαφανίζονται μεταξύ των δύο εποχών. Τέλος, παρατηρείται μία περίπτωση (J101056.69+355833.3) στην οποία δύο μεγάλης ταχύτητας διπλέτες Si IV και οι αντίστοιχες του C IV αναδύονται μεταξύ των δύο εποχών.



Εικόνα 6.13. Για κάθε quasar δίνονται τα οπτικά βάθη τ_{blue}(CIV) [διαγράμματα (I)], τ_{red}(C IV) [διαγράμματα (II)], τ_{blue}(Si IV) [διαγράμματα (III)] και τ_{red}(Si IV) [διαγράμματα (IV)] συναρτήσει της ταχύτητας απομάκρυνσης, για τις δύο διαφορετικές περιόδους. Τα μη γεμισμένα σχήματα καταδεικνύουν τις συνιστώσες που έχουν υποστεί μεταβολή ως προς το οπτικό τους βάθος. Στα διαγράμματα είναι εμφανές ότι οι BALs εμφανίζουν μεταβολές σε μεμονωμένες συνιστώσες. Σε κανέναν BALQSO δεν παρατηρείται μεταβολή όλων των συνιστωσών που την αποτελούν.



Εικόνα 6.13. Συνέχεια



Εικόνα 6.13. Συνέχεια



Εικόνα 6.13. Συνέχεια



Εικόνα 6.13. Συνέχεια

Στη συνέχεια εξετάζεται η μεταβλητότητα των συνιστωσών Si IV και C IV συναρτήσει της ταχύτητας. Για το λόγο αυτό χωρίζεται το πεδίο τιμών των ταχυτήτων σε περιοχές εύρους 1000 km/s έκαστος. Σε κάθε εύρος ταχύτητας (κλάση) μετρούμε τον αριθμό των παρατηρούμενων συνιστωσών απορρόφησης και τον αριθμό των μεταβαλλόμενων συνιστωσών. Στην Εικόνα 6.14(a) παρουσιάζεται ο αριθμός των παρατηρούμενων Si IV_{blue} και C IV_{blue} συνιστωσών (εστιγμένα ορθογώνια) και ο αριθμός των μεταβαλλόμενων συνιστωσών Si IV_{blue} (γκρι ορθογώνια) και μεταβαλλόμενων συνιστωσών C IV_{blue} (ορθογώνια με μπλε διαγράμμιση) σε κάθε κλάση ταχύτητας. Στην Εικόνα 6.14(b) παρουσιάζονται τα ίδια αλλά για τις συνιστώσες απορρόφησης Si IV_{red} και C IV_{red}. Παρατηρούμε ότι από ένα σύνολο 118 διπλετών Si IV και 118 διπλετών C IV, σε αντίστοιχες ταχύτητες, το Si IV επιδεικνύει μεγαλύτερη εμφάνιση μεταβλητότητας. Πιο συγκεκριμένα, 68 από τις 118 (~58%) συνιστώσες Si IV_{blue} εμφανίζουν μεταβολές ως προς το οπτικό τους βάθος, ενώ 44 από 118 (~37%) Si IV_{red} επιδεικνύουν μεταβαλλόμενα οπτικά βάθη. Στην περίπτωση του C IV έχουμε 52 από 118 (~44%) μεταβαλλόμενες C IV_{blue} συνιστώσες και 45 από 118 (~38%) μεταβαλλόμενες C IV_{red} συνιστώσες. Αν θεωρηθεί μια διπλέτα μεταβαλλόμενη αρκεί να μεταβάλλει μόνο τη μία της συνιστώσα (μπλε ή κόκκινη) τότε έχουμε 75 από 118 (~64%) διπλέτες Si IV οι οποίες επιδεικνύουν μεταβαλλόμενο οπτικό βάθος και 63 από 118 (~53%) μεταβαλλόμενες διπλέτες C IV. Η σύγκριση μεταξύ των αριθμών των μεταβαλλόμενων συνιστωσών Si IV και C IV δίνεται στην Εικόνα 6.1.4(c),όπου με γκρι χρώμα σημειώνονται οι μεταβαλλόμενες διπλέτες Si IV ενώ με διαγράμμιση σημειώνονται οι μεταβαλλόμενες διπλέτες C IV σε κάθε κλάση ταχύτητας.

Από την Εικόνα 6.14 είναι εμφανές ότι οι συνιστώσες Si IV και C IV εμφανίζουν μεταβολές σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Ο αριθμός των μεταβαλλόμενων συνιστωσών Si IV και C IV εμφανίζει ένα μέγιστο στο εύρος μεταξύ -2000 km/s και -9000 km/s. Ο αριθμός των μεταβαλλόμενων συνιστωσών Si IV_{blue} και C IV_{blue} όπως επίσης και των Si IV_{red} εμφανίζει μέγιστο στο ίδιο εύρος ταχυτήτων (-2000 και -9000 km/s). Εντούτοις, ο αριθμός των μεταβαλλόμενων C IV_{red} συνιστωσών εμφανίζει μέγιστο μεταξύ -6000 και -9000 km/s. Στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, το Si IV επιδεικνύει μεγαλύτερη εμφάνιση μεταβλητότητας από τον C IV, στα ίδια εύρη ταχυτήτων.

Στη συνέχεια εξετάζουμε την εμφάνιση μεταβλητότητας των διπλετών Si IV χωρίς την εμφάνιση μεταβλητότητας των αντίστοιχων διπλετών C IV στις ίδιες ταχύτητες και το αντίστροφο. Παρατηρήθηκε ότι από τις 75 μεταβαλλόμενες διπλέτες Si IV υπάρχουν 38 οι οποίες επιδεικνύουν μεταβολές στις αντίστοιχες διπλέτες του C IV στην ίδια ταχύτητα απομάκρυνσης (~51%). Απεναντίας, από τις 63 μεταβαλλόμενες διπλέτες C IV εμφανίζονται 38 οι οποίες επιδεικνύουν μεταβολές στις αντίστοιχες συνιστώσες του Si IV στην ίδια ταχύτητα (~60%). Συνεπώς, είναι πιο πιθανό να βρεθεί μεταβαλλόμενη διπλέτα Si IV όταν μεταβάλλεται η αντίστοιχη διπλέτα του C IV, στην ίδια ακτινική ταχύτητα και όχι το αντίστροφο.

Στο ιστόγραμμα 6.15(a) εμφανίζεται με μαύρο χρώμα το ποσοστό των μπλε συνιστωσών του Si IV που έχει υποστεί μεταβολή του οπτικού βάθους ενώ με μπλε χρώμα εμφανίζεται το ποσοστό των μπλε συνιστωσών του C IV που έχει υποστεί μεταβολή του οπτικού βάθους στις περιοχές ταχυτήτων που έχουν οριστεί. Στο ιστόγραμμα 6.15(b) παρουσιάζονται τα ίδια με το 6.15(a) αλλά για τις κόκκινες συνιστώσες των Si IV και C IV. Από τα ιστογράμματα 6.15 δεν διαφαίνεται κάποια τάση για συχνότερη εμφάνιση μεταβλητότητας σε συγκεκριμένες ταχύτητες.



Εικόνα 6.14. (a) Αριθμός παρατηρούμενων συνιστωσών σε κάθε κλάση ταχύτητας (εστιγμένα ορθογώνια), αριθμός μεταβαλλόμενων Si IV_{blue} συνιστωσών (γκρι ορθογώνια) σε κάθε κλάση ταχύτητας και αριθμός μεταβαλλόμενων C IV_{blue} συνιστωσών (ορθογώνια με μπλε διαγράμμιση) σε κάθε κλάση ταχύτητας. (b) Αριθμός παρατηρούμενων συνιστωσών σε κάθε κλάση ταχύτητας (εστιγμένα ορθογώνια), αριθμός μεταβαλλόμενων Si IV_{red} συνιστωσών (γκρι ορθογώνια) σε κάθε κλάση ταχύτητας και αριθμός μεταβαλλόμενων C IV_{red} συνιστωσών (ορθογώνια), αριθμός μεταβαλλόμενων Si IV_{red} συνιστωσών (γκρι ορθογώνια) σε κάθε κλάση ταχύτητας (εστιγμένα ορθογώνια), αριθμός μεταβαλλόμενων Si IV_{red} συνιστωσών (ορθογώνια) σε κάθε κλάση ταχύτητας και αριθμός μεταβαλλόμενων C IV_{red} συνιστωσών (ορθογώνια) σε κάθε κλάση ταχύτητας. (c) Αριθμός μεταβαλλόμενων Si IV (γκρι ορθογώνια) σε κάθε κλάση ταχύτητας και αριθμός μεταβαλλόμενων C IV_{red} συνιστωσών (ορθογώνια) σε κάθε κλάση ταχύτητας και αριθμός μεταβαλλόμενων C IV_{red} συνιστωσών (ορθογώνια) σε κάθε κλάση ταχύτητας. (c) Αριθμός μεταβαλλόμενων διπλετών C IV σε κάθε κλάση ταχύτητας.


Εικόνα 6.15. Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τη συχνότητα εμφάνισης μεταβλητότητας μεταξύ των Si IV_{blue} – C IV_{blue} και Si IV_{red} – C IV_{red}.

6.2.3.1. Συντονισμένη και μη-συντονισμένη μεταβλητότητα

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η συμπεριφορά της μεταβλητότητας μεταξύ των μελών (μπλε και κόκκινη) των διπλετών Si IV και C IV. Πιο συγκεκριμένα εξετάζουμε τις σχέσεις: (α) Si IV_{blue} – Si IV_{red}, (β) C IV_{blue} – C IV_{red}, (γ) Si IV_{blue} – C IV_{blue}, (δ) Si IV_{red} – C IV_{red}, για διπλέτες Si IV και C IV που στον ίδιο quasar βρίσκονται στις ίδιες ταχύτητες.

Στην περίπτωση του Si IV βρέθηκαν 36 από 75 (~48%) μεταβαλλόμενες διπλέτες οι οποίες επιδεικνύουν συντονισμένη μεταβλητότητα μεταξύ των μελών τους, δηλαδή και τα δύο μέλη μιας διπλέτας βαθαίνουν ή ρηχαίνουν. Σε αντίθεση, βρέθηκε μόνο 1 διπλέτα από τις 75 (~1%) στην οποία το ένα μέλος της διπλέτας βαθαίνει ενώ το άλλο ρηχαίνει συναρτήσει του χρόνου. Επίσης, βρεθήκαν 38 από τις 75 μεταβαλλόμενες διπλέτες Si IV στις οποίες μεταβάλλεται μόνο το ένα μέλος ενώ το άλλο διατηρεί το οπτικό του βάθος σταθερό.

Στην περίπτωση του C IV βρέθηκαν 32 από τις 63 (~51%) μεταβαλλόμενες διπλέτες οι οποίες επιδεικνύουν συντονισμένη μεταβλητότητα μεταξύ των μελών τους, δηλαδή και τα δύο μέλη μιας διπλέτας βαθαίνουν ή ρηχαίνουν. Σε αντίθεση, βρέθηκαν 2 από τις 63 (~3%) διπλέτες στις οποίες το ένα μέλος της διπλέτας βαθαίνει ενώ το άλλο ρηχαίνει. Τέλος, βρέθηκαν 29 από τις 63 (~46%) μεταβαλλόμενες διπλέτες C IV στις οποίες το μεταβάλλεται μόνο το ένα μέλος ενώ το άλλο διατηρεί το οπτικό του βάθος σταθερό μεταξύ των δύο εποχών.

Από τις 118 συνιστώσες Si IV_{blue} και 118 συνιστώσες C IV_{blue}, βρέθηκαν 28 (~24%) οι οποίες μεταβάλλονται στις ίδιες ταχύτητες. Οι 23 από τις 28 (~82%) συνιστώσες μεταβάλλονται εν φάση (και οι δύο βαθαίνουν ή ρηχαίνουν) ενώ οι εναπομείνασες 5 εμφανίζουν μη-συντονισμένη μεταβλητότητα. Από τις 118 συνιστώσες Si IV_{red} και 118 συνιστώσες C IV_{red} βρέθηκαν 17 (~14%) οι οποίες μεταβάλλονται στις ίδιες ταχύτητες. Οι 15 από τις 17 (~88%) μεταβάλλονται εν φάση ενώ οι 2 μόλις επιδεικνύουν μη-συντονισμένες μεταβολές.

Κεφάλαιο 7

Συζήτηση

7.1. Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων προσομοίωσης των 20 BALQSOs

Όπως προαναφέρθηκε, κάνοντας χρήση του μοντέλου GR (Danezis et al. 2003, 2007, 2009; Lyratzi et al. 2007, 2009), του φυσικού μοντέλου και των κριτηρίων fitting των Stathopoulos et al. (2015, 2019) και του λογισμικού ASTA (Tzimeas et al. 2019) καθίσταται δυνατή η ανάλυση των κοιλάδων απορρόφησης των Si IV και C IV στον ακριβή και μοναδικά καθορισμένο αριθμό συνιστωσών απορρόφησης από τις οποίες αποτελούνται. Ως αποτέλεσμα είναι δυνατή η μελέτη της κάθε συνιστώσας απορρόφησης ξεχωριστά, δηλαδή είναι δυνατή η μελέτη των φυσικών συνθηκών των συστημάτων απορρόφησης, που εδράζονται στη γραμμή παρατήρησης, τα οποία και δημιουργούν τις έντονες και περίπλοκες κοιλάδες απορρόφησης που είναι γνωστές ως BALs. Εκτός αυτών, μέσω του μοντέλου GR παρέχεται η τελική συνάρτηση, η οποία παρεμβαλλόμενη στα σημεία του φάσματος, μπορεί να προσομοιώσει τον συνολικό σχηματισμό μια κοιλάδας απορρόφησης αλλά και την συνολική φασματική περιοχή BALs.

Στην εν λόγω μελέτη, τα υπολογιζόμενα εύρη (FWHM) των συνιστωσών απορρόφησης των BALs των Si IV και C IV είναι κατά πολύ μεγαλύτερα από τα θερμικά εύρη για ένα αέριο θερμοκρασίας $10^4 - 10^5$ K. Ακόμη και αν λάβουμε υπόψη ότι στην διεύρυνση των συνιστωσών συνεισφέρει και το πεδίο ταχυτήτων της μικρο-τυρβώδους ροής (βλέπε § 4.2), τα εύρη των συνιστωσών παραμένουν μεγάλα. Προκειμένου να ερμηνευθεί η ανωτέρω ασυνέπεια, προτάθηκε (Stathopoulos et al. 2015) ότι τα αποκαλούμενα νέφη είναι σμήνη από μικρότερες υπομονάδες οι οποίες καλούνται clumps. Κάθε clump παράγει μια γραμμή απορρόφησης το εύρος της οποίας εξαρτάται από τις θερμικές και μη θερμικές (microturbulent) κινήσεις των ιόντων εκάστου clump. Η σύνθεση όλων αυτών των clumps γραμμών απορρόφησης, οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά στον χώρο των ταχυτήτων με αποτέλεσμα να αλληλεπικαλύπτονται, παράγουν τις πλατιές συνιστώσες που αντιστοιχούν στα νέφη. Η σύνθεση των πλατιών συνιστωσών, των νεφών, δημιουργεί τα πλατιά αυλάκια απορρόφησης που καλούνται BALs.

Το γεγονός ότι οι πλατιές κοιλάδες απορρόφησης των Si IV και C IV μπορούν να αναλυθούν, με μοναδικό τρόπο, σε επιμέρους συνιστώσες, σύμφωνα με τη μέθοδο που προτάθηκε από τους Stathopoulos et al. (2015, 2019), αποτελεί μια ισχυρή ένδειξη ότι οι εκροές των BALQSOs δεν είναι ομαλές και ομοιογενείς αλλά στο εσωτερικό τους αναπτύσσονται δομές (νέφη) οι οποίες είναι υπεύθυνες για το σχηματισμό των BALs. Τα νέφη πλάσματος χαρακτηρίζονται από παρόμοιες αποστάσεις από την μελανή οπή (βρίσκονται πολύ κοντά στο χώρο των ταχυτήτων), παρόμοια κινηματική συμπεριφορά και φυσικές συνθήκες (Stathopoulos et al. 2015, 2017, 2019). Το αποτέλεσμα ότι οι κοιλάδες απορρόφησης των Si IV και C IV αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών, οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά στο χώρο των ταχυτήτων, και χαρακτηρίζονται από παρόμοια κινηματική συμπεριφορά, καταδεικνύουν ότι και τα δύο ιόντα ανήκουν στο ίδιο σύστημα απορρόφησης, δηλαδή ανήκουν στο ίδιο νέφος και ότι αποτελούν μέρος της ίδιας εκροής (Stathopoulos et al. 2015, 2017, 2019).

Τα εν λόγω αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από την μελέτη των Lu & Lin (2018) οι οποίοι μελέτησαν τις BALs Si IV και C IV του SDSS J002710.06-094435.3. Πιο συγκεκριμένα οι Lu & Lin (2018) βρήκαν ότι οι BALs Si IV και C IV αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών (κριτήριο 2α: Stathopoulos et al. 2015) οι οποίες δημιουργούνται σε νέφη απορρόφησης τα οποία χαρακτηρίζονται από παρόμοια κινηματική συμπεριφορά και φυσικές συνθήκες και ότι τα νέφη περιέχουν τόσο ιόντα Si IV όσο και C IV. Σημειώνεται ότι οι Lu & Lin εξαιτίας των αποτελεσμάτων τους καθορίζουν έναν νέο τύπο BALs (BALs τύπου II) οι οποίες χαρακτηρίζονται από προφίλ το οποίο μπορεί να διακριθεί σε πολλαπλές συνιστώσες. Οι σημαντικές διαφορές μεταξύ της εν λόγω διατριβής και αυτής των Lu & Lin (2018) είναι ότι:

- Οι Lu & Lin (2018) παρόλο που βασίζουν την μελέτη τους στην ίδια λογική με αυτή των Stathopoulos et al. (2015), ότι δηλαδή οι BALs Si IV και C IV είναι σύνθεση επιμέρους συνιστωσών και ότι οι BALs και των δύο ιόντων αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών, δεν απαντούν στο κρίσιμο ερώτημα της μοναδικότητας του αριθμού αυτών. Δηλαδή, δεν προτείνουν μία μέθοδο (κριτήρια fitting) η οποία να εξασφαλίζει, συγχρόνως και για τα δύο ιόντα, ότι το τελικό best fit, ο αριθμός των συνιστωσών και οι τιμές των υπολογιζόμενων φυσικών παραμέτρων είναι όλα καθορισμένα με μοναδικό τρόπο.
- Εξαιτίας της έλλειψης μεθόδου (κριτηρίων fitting), ικανής να εγγυηθεί τη συνεπή μελέτη και των δύο ιόντων, ενώ έδειξαν ότι η BAL του C IV αποτελείται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών με την BAL Si IV, κατάφεραν να επιτύχουν την καλύτερη δυνατή προσαρμογή, μέσω πολλαπλών συνιστωσών, μόνο της BAL του Si IV και όχι του C IV επειδή η τελευταία εμφανίζει σύνθετο προφίλ για το οποίο δεν επετεύχθη ανάλυση στις συνιστώσες από τις οποίες αποτελείται.

Σε αντίθεση, στην εν λόγω διατριβή όπως και στις εργασίες Stathopoulos et al. (2015, 2017, 2019), εξαιτίας της διατύπωσης αυστηρών και συνεπών με τη φυσική θεωρία κριτηρίων fitting, μελετώνται και αναλύονται με μοναδικό τρόπο, για πρώτη φορά, οι BALs Si IV και C IV, σε ένα δείγμα 20 BALQSOs.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη των διαγραμμάτων, προερχόμενων από την ανάλυση των μετρούμενων φυσικών παραμέτρων, είναι ενισχυτικά του φυσικού μοντέλου της BAL περιοχής που προτάθηκε από τους Stathopoulos et al. (2015). Επιπροσθέτως, τα εν λόγω διαγράμματα προσφέρουν μια σειρά επιπλέον συμπερασμάτων που αφορούν τόσο τις BALs και την μελέτη τους, όσο και την BAL περιοχή, τις φυσικές της συνθήκες, τη δομή της, και την κινηματική της συμπεριφορά.

Στα διαγράμματα 6.4 όπου και παρουσιάζονται τα FWHM των συνιστωσών απορρόφησης των Si IV και C IV συναρτήσει της ταχύτητας απομάκρυνσης, είναι

εμφανές ότι οι συνιστώσες απορρόφησης που βρίσκονται στις μεγάλες ταχύτητες έχουν μεγαλύτερα εύρη (FWHM).

Στα διαγράμματα της Εικόνας 6.5 καταδεικνύεται το γεγονός ότι οι συνιστώσες που βρίσκονται στις μεγάλες ακτινικές ταχύτητες απομάκρυνσης χαρακτηρίζονται από μικρότερα οπτικά βάθη, σε αντίθεση με τις συνιστώσες που εντοπίζονται στις μικρές ταχύτητες οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλα οπτικά βάθη. Το γεγονός ότι οι απορροφήσεις είναι ασθενέστερες στις μεγάλες ταχύτητες απομάκρυνσης είναι σε συμφωνία με τα ευρήματα των Korista et al. (1993) και Capellupo et al. (2011).

Στην Εικόνα 6.6(a, b) παρουσιάζονται οι συσχετίσεις μεταξύ των οπτικών βαθών (τ_0) , των FWHM και των ταχυτήτων των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του Si IV και του C IV αντιστοίχως, για τους 20 BALQSOs. Στα διαγράμματα, είναι εμφανές ότι η BAL περιοχές των Si IV και C IV δεν συνιστούν περιοχές ανάπτυξης ομαλού και ομοιογενούς ανέμου αλλά περιοχές ανάπτυξης ανομοιογενειών (νεφών) εντός του ανέμου. Επειδή όμως τα νέφη απορρόφησης περιέχουν τόσο ιόντα Si IV όσο και C IV, στην Εικόνα 6.6(c) παρουσιάζονται οι περιοχές πυκνότητας των συνιστωσών απορρόφησης και του Si IV και του C IV.

Στην Εικόνα 6.6(c) είναι εμφανές ότι μειούμενης της ταχύτητας, δηλαδή όταν οι συνιστώσες απορρόφησης βρίσκονται πιο κοντά στην BEL, χαρακτηρίζονται από μικρότερα FWHM αλλά μεγαλύτερα οπτικά βάθη. Από τις εικόνες αυτές, οδηγούμαστε σε μια επέκταση του φυσικού μοντέλου δομής του περιβάλλοντος της εκροής των quasars. Η εκροή πιο κοντά στο δίσκο χαρακτηρίζεται από έντονη ανομοιογένεια, αποτελούμενη από νέφη μεγαλύτερης πυκνότητας άρα και μεγαλύτερου οπτικού βάθους (έντονη clumping structure). Καθώς η ροή επιταχύνεται ακτινικά, η πυκνότητα των νεφών μειώνεται αυξανομένης της ταχύτητας και η εκροή τείνει να εξελιχθεί σε ομαλό άνεμο στις μεγάλες ακτινικές ταχύτητες απομάκρυνσης. Επειδή ο clumping wind επεκτεινόμενος τείνει να εξελιχθεί σε ομαλό άνεμο σημαίνει ότι οι συνιστώσες απορρόφησης που αντιστοιχούν σε νέφη θα πρέπει στις μεγάλες ταχύτητες να αποκτούν μικρά οπτικά βάθη και μεγάλα FWHM μέχρι του σημείου που οι συνιστώσες αυτές λόγω μικρού βάθους και μεγάλης έκτασης ουσιαστικά και πρακτικά να εξαφανίζονται εφόσον δεν θα μπορούν να διακριθούν μέσα στο θόρυβο του συνεχούς.

Όλα τα προηγούμενα, τα οποία έχουν προκύψει μέσω των μετρήσεων είναι συνεπή και επιβεβαιώνουν μια σειρά δημοσιευμένων επιστημονικών απόψεων.

Στα μοντέλα εκροών των Murray et al. (1995), Elvis, (2000), Hall & Hutsemékers, (2004), Higginbottom et al. (2013), Takeuchi et al. (2013), ο άνεμος εκτοξεύεται κάθετα προς τον δίσκο προσαύξησης και επιταχύνεται ακτινικά εξαιτίας της πίεσης της ακτινοβολίας. Αν ο quasar παρατηρείται διαμέσου του ανέμου, κατά μήκος των γραμμών εκροής, τότε στο φάσμα του εμφανίζονται πλατιές γραμμές απορρόφησης (για ένα εύρος γωνιών παρατήρησης ανάλογα με το μοντέλο). Σύμφωνα με τα ανωτέρω μοντέλα, κατά μήκος των γραμμών εκροής αυξάνεται, όπως και η θερμοκρασία ενώ η πυκνότητα του αερίου μειώνεται. Αν ο quasar παρατηρείται κατά μήκος της εκροής, επειδή η εκροή επιταχύνεται ακτινικά, τότε οι γραμμές απορρόφησης μικρών ταχυτήτων προέρχονται από περιοχές πιο κοντά στη μελανή οπή ενώ οι γραμμές απορρόφησης μεγάλων ταχυτήτων από περιοχές πολύ πιο απομακρυσμένες από την μελανή οπή.

• Σύμφωνα με τις ακτινοβολιακές-υδροδυναμικές προσεγγίσεις των Takeuchi et al. (2013) επειδή η πυκνότητα του αερίου μειώνεται κατά την κατεύθυνση της επιτάχυνσης, ενεργοποιείται η αστάθεια Rayleigh-Taylor η οποία είναι υπεύθυνη για τον σχηματισμό πυκνωμάτων (clumps) εντός της εκροής, τα οποία επιταχύνονται προς τα έξω. Τα πυκνώματα μεγέθους $l\sim 10r_S \approx 3 * 10^{12}$ m σχηματίζονται σε απόσταση $\sim 250r_S - 300r_S$ (όπου r_S η ακτίνα Schwarzschild) και έχουν πυκνότητα ρ $\sim 10^{-6}$ gr/cm³. Σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 500 r_S η πυκνότητα των νεφών πέφτει κατά τρεις μονάδες μεγέθους και η εκροή εξελίσσεται τείνοντας σε έναν αραιό και ομοιογενές αέριο. Παρόμοια εικόνα περί της εξέλιξης των νεφών παρουσιάζεται από τους Weymann et al. (1985) και Faucher-Giguére (2012). Σύμφωνα με τους πρώτους, τα μεγάλα νέφη ακολουθούνται από μικρότερα νέφη (cloudlets) τα οποία αποκολλώνται από το νέφος και επιταχύνονται σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Σύμφωνα με τους Faucher-Giguére (2012) ωστικά κύματα τα οποία διαδίδονται δια μέσω της εκροής κομματιάζουν τα νέφη σε μικρότερα κομμάτια (cloudlets).

Στην Εικόνα 6.7(a) δίνεται η σύγκριση των FWHM των συνιστωσών του Si IV με το FWHM των αντίστοιχων συνιστωσών του C IV που βρίσκονται στις ίδιες ακτινικές ταχύτητες, για τους 20 BALQSOs. Πιο συγκεκριμένα, κάθε σημείο του διαγράμματος παρουσιάζει τη συσχέτιση των FWHM των συνιστωσών του Si IV και C IV, του αυτού quasar, οι οποίες παρουσιάζουν την ίδια ακτινική ταχύτητα. Από τις συγκρίσεις αυτές παρατηρούμε ότι FWHM_{CIV} \geq FWHM_{SiIV}. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το θερμικό εύρος του C IV είναι μεγαλύτερο από το θερμικό εύρος του Si IV και το εύρος λόγω microturbulence είναι της ίδιας τάξης μεγέθους μεταξύ των δύο ιόντων. Το γεγονός ότι το αποτέλεσμα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνεται από την φυσική θεωρία καταδεικνύει την ορθότητα των προσομοιώσεων και την ακρίβεια των υπολογιζόμενων τιμών των παραμέτρων.

Στην Εικόνα 6.7(b) κάθε σημείο του διαγράμματος αντιστοιχεί στο λόγο < FWHM_{CIV}/FWHM_{SiIV} > όπου τα δυο FWHM αντιστοιχούν στον αυτό quasar και σε συνιστώσες των Si IV και C IV που παρουσιάζουν την ίδια ακτινική ταχύτητα. Στατιστικά, μεταξύ των 20 BALQSOs, για ένα σύνολο 241 συνιστωσών Si IV και 241 συνιστωσών C IV, είναι < FWHM_{CIV}/FWHM_{SiIV} >= 1.37 ± 0.22 με συντελεστή απόκλισης CV ≈ 16%. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε μελλοντική προσομοίωση των Si IV και C IV, στους BALQSOs, οι τιμές αυτές αποτελούν κριτήριο ορθής προσομοίωσης των Si IV και C IV και C IV καθώς επίσης και του ορθού υπολογισμού των τιμών των FWHM των Si IV και C IV.

Στα γραφήματα της Εικόνας 6.8 δίνεται η σύγκριση των οπτικών βαθών μεταξύ συνιστωσών Si IV και C IV. Κάθε σημείο του γραφήματος αντιστοιχεί σε συνιστώσες Si IV και C IV του αυτού quasar και της ίδιας ταχύτητας από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, τα οπτικά βάθη των συνιστωσών (μπλε και κόκκινες) του C IV είναι μεγαλύτερα από τα οπτικά βάθη των συνιστωσών του Si IV. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε συμφωνία με τους Capellupo et al. (2013). Ενδιαφέρον αποτελεί το αποτέλεσμα ότι από τις 241 συνιστώσες Si IV και C IV οι 82 μπλε συνιστώσες Si IV (~34%) έχουν τ_{blue}(Si IV) \geq τ_{blue}(C IV) ενώ 76 κόκκινες συνιστώσες Si IV (~32%) έχουν τ_{red}(Si IV) \geq τ_{red}(C IV). Αν θεωρηθούν ηλιακές αφθονίες, τότε ο C IV θα είναι πιο άφθονος από το Si IV και θα περίμενε κανείς όλες οι συνιστώσες του C IV να έχουν συνιστωσά το Si IV και συνιστωσών του Si IV

(Capellupo et al. 2012)-για συνιστώσες Si IV και C IV του ιδίου quasar που βρίσκονται στην ίδια ταχύτητα απομάκρυνσης από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής. Το γεγονός ότι βρέθηκαν συνιστώσες Si IV με οπτικά βάθη μεγαλύτερα από τις αντίστοιχες του C IV μπορεί να ερμηνευθεί είτε θεωρώντας πως σε αυτές τις περιπτώσεις το Si IV έχει μεγαλύτερο συντελεστή κάλυψης από τον C IV είτε ότι δεν ισχύουν οι ηλιακές αφθονίες με αποτέλεσμα να απαντώνται τέτοιου είδους ανωμαλίες. Βέβαια δεν μπορεί να αποκλειστεί και η υπόθεση να λαμβάνει χώρα ένας συνδυασμός των ανωτέρω. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως λόγοι εντάσεων Si IV/C IV > 1 έχουν παρατηρηθεί από τους Henize et al. (1976) στην περίπτωση Βε αστέρων και από τους Gänsicke et al. (2003) στην περίπτωση κατακλυσμιαίων μεταβλητών αστέρων (CVs). Η τελευταία παρατήρηση αποκτά ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον αν ληφθούν υπόψη οι αναλογίες μεταξύ των BALQSOs και των θερμών αστέρων που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2 και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Στην Εικόνα 6.9 παρουσιάζεται ο λόγος των οπτικών βαθών μεταξύ των γραμμών συντονισμού της διπλέτας του Si IV $[\tau_{blue}/\tau_{red}$ (Si IV)] συναρτήσει του λόγου οπτικών βαθών μεταξύ των γραμμών συντονισμού της διπλέτας του C IV $[\tau_{blue}/\tau_{red}$ (C IV)]. Κάθε σημείο του διαγράμματος παρουσιάζει τη συσχέτιση συνιστωσών του Si IV και C IV, του αυτού quasar, οι οποίες παρουσιάζουν την ίδια ακτινική ταχύτητα από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής. Όπως παρατηρούμε, στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων οι λόγοι αυτοί διαφέρουν μεταξύ των δύο ιόντων. Πιο συγκεκριμένα, μόλις 29 διπλέτες από τις 241 (~12%) χαρακτηρίζονται από $τ_b/\tau_r$ (Si IV) = $\tau_{\rm b}/\tau_{\rm r}$ (C IV). Εξίσου σημαντικό βέβαια είναι το εύρημα ότι οι λόγοι αυτοί αποκλίνουν από τη θεωρητική τιμή που είναι 2:1, γεγονός που καταδεικνύει ότι τα νέφη απορρόφησης του Si IV και του C IV δεν καλύπτουν πλήρως την πηγή της συνεχούς ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούνται 22 από τις 241 (~9%) διπλέτες C IV με $τ_b/τ_r$ (C IV) = 2 ενώ παρατηρούνται 30 συνιστώσες Si IV από τις 241 (~12%) με $\tau_{\rm b}/\tau_{\rm r}$ (Si IV) = 2. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, οδηγούμαστε στο φαινόμενο της μερικής κάλυψης. Το γεγονός βέβαια ότι οι λόγοι αυτοί διαφέρουν και μεταξύ των δύο ιόντων αποτελεί ένδειξη ότι οι συντελεστές κάλυψης των Si IV και C IV είναι διαφορετικοί. Δεχόμενοι την άποψη ότι τα δύο ιόντα είναι κομμάτι της ίδιας εκροής και ότι μιας και ένα νέφος απορρόφησης περιέχει Si IV και C IV, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι το Si IV είναι δυνατόν να καταλαμβάνει διαφορετική έκταση επί του νέφους απορρόφησης από ότι ο C IV, που σημαίνει ότι τα δύο ιόντα δεν είναι ισοκατανεμημένα εντός των νεφών.

Δεδομένου λοιπόν, ότι μέσα σε ένα νέφος, δεν είναι ισοκατανεμημένοι οι απορροφητές Si IV και C IV, κάθε κίνηση του νέφους εντός ή εκτός γραμμής παρατήρησης, θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή μείωση των απορροφητών του ενός ιόντος σε βάρος του άλλου. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να αυξομειώνεται τεχνητά ο λόγος των οπτικών βαθών μεταξύ των συνιστωσών μιας διπλέτας αλλά και μεταξύ διπλετών Si IV και C IV που βρίσκονται στην ίδια ταχύτητα. Όλα τα προηγούμενα όμως είναι απόδειξη της ύπαρξης νεφών, καθώς αν οι BALs ήταν το προϊόν ομαλού και ομοιογενούς ανέμου τότε δεν θα εμφανιζόντουσαν αυτές οι αποκλίσεις.

Όσον αφορά το πόσο ισχυρές είναι οι απορροφήσεις των συνιστωσών του Si IV και του C IV από την Εικόνα 6.10 μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι: από τις συνολικά 241 μπλε συνιστώσες Si IV και C IV που βρίσκονται στις ίδιες ταχύτητες απομάκρυνσης, οι 49 (~20%) συνιστώσες του Si IV χαρακτηρίζονται από EW(Si IV_{blue}) > EW(C IV_{blue}). Από τις 241 κόκκινες συνιστώσες Si IV και C IV που βρίσκονται στις ίδιες ταχύτητες απομάκρυνσης, οι 50 (~21%) συνιστώσες του Si IV χαρακτηρίζονται από $EW(SiIV_{red}) > EW(CIV_{red})$. Συνεπώς σε ένα ποσοστό ~80% εντός του ιδίου quasar, οι διπλέτες απορρόφησης του C IV εμφανίζουν πιο έντονη απορρόφηση από τις αντίστοιχες διπλέτες του Si IV, στην ίδια ταχύτητα. Δηλαδή οι απορροφήσεις του Si IV είναι γενικά πιο ασθενείς από αυτές του C IV.

7.2. Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων μελέτης της μεταβλητότητας στους 10 BALQSOs

7.2.1. Γενικές Παρατηρήσεις

Σε αυτή την παράγραφο γίνεται συζήτηση επί των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από την ανάλυση των BALS Si IV και C IV μεταξύ δύο διαφορετικών χρονικών εποχών, προκειμένου να μελετηθεί η μεταβλητότητά τους. Στο πλαίσιο αυτών των αποτελεσμάτων συζητούνται διαφορετικά σενάρια για την πρόκληση της παρατηρούμενης μεταβλητότητας των BALs Si IV και C IV.

Σημειώνεται ότι δεν παρέχονται ευθείς συγκρίσεις μεταξύ της εν λόγω μελέτης μεταβλητότητας και άλλων μελετών. Ο λόγος είναι, όπως αναφέρεται στην § 2.4, ότι οι υπόλοιπες μελέτες διερευνούν την μεταβλητότητα είτε μέσω μετρήσεων του συνολικού ισοδύναμου εύρους μιας BAL κοιλάδας (Lundgren et al. 2007; Gibson et al. 2010; Welling et al. 2014; Wildy et al. 2014; He et al. 2014), είτε μέσω μετρήσεων σε αυθαίρετα επιλεγμένα κομματιών των BALs (Gibson et al. 2008; Capellupo et al. 2011, 2012, 2013; Filiz Ak et al. 2013; He et al. 2015).

όσο είναι δυνατόν να γνωρίζουμε μελέτες μεταβλητότητας που Από επικεντρώνονται σε συνιστώσες των BALs είναι αυτές των Vilkoviskij & Irwin (2001) και Lu & Lin (2018). Οι Vilkoviskij & Irwin (2001) παρατήρησαν αύξηση του βάθος των συνιστωσών απορρόφησης του BALQSO Q13031308 τις οποίες απέδωσαν σε μεταβολές της λαμπρότητας του κεντρικού αντικειμένου. Σημειώνεται ότι οι Vilkoviskij & Irwin (2001) μελετούν το φάσμα του Q1303+308 (βλέπε Εικόνα 2.1) ο οποίος αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα BALQSO του οποίου οι κοιλάδες απορρόφησης φέρουν πλειάδα διακριτών φασματικών χαρακτηριστικών. Έτσι, στην εν λόγω μελέτη γίνεται απλά σύγκριση των παρατηρούμενων διακριτών φασματικών χαρακτηριστικών απορρόφησης μεταξύ δύο διαφορετικών περιόδων και εντοπίζεται η διαφορά τους. Επιπροσθέτως, στην εν λόγω μελέτη δεν αναλύονται τα διακριτά φασματικά χαρακτηριστικά στις συνιστώσες από τις οποίες αποτελούνται, δεν υπολογίζονται φυσικές παράμετροι των συνιστωσών και κατά συνέπεια δεν μελετάται η μεταβλητότητα των νεφών στη γραμμή παρατήρησης.

Οι Lu & Lin (2018), επιβεβαιώνοντας τη μελέτη των Stathopoulos et al. (2015), έδειξαν ότι οι BALs Si IV και C IV, του J002710.06-094435.3, αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών (4 συνιστώσες για κάθε μέλος της διπλέτας συντονισμού) και βρήκαν ότι όλες οι μεταβαλλόμενες συνιστώσες του Si IV εμφανίζουν συντονισμένη μεταβλητότητα την οποία απέδωσαν στις μεταβολές του συνεχούς. Σημειώνεται ότι όσον αφορά την BAL του C IV, ενώ βρήκαν ότι αποτελείται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών με την BAL Si IV, δεν κατάφεραν να την προσομοιώσουν με αποτέλεσμα να μην μπορέσουν να μελετήσουν την μεταβλητότητα και των δύο ιόπτων (Si IV και C IV). Επίσης, μέσω της μεθόδου τους δεν απαντούν στο κρίσιμο ερώτημα αν το τελικό best fit είναι καθορισμένο με μοναδικό τρόπο.

Επειδή λοιπόν, η εν λόγω μελέτη είναι η πρώτη αλλά και μοναδική μέχρι τώρα, κατά την οποία αναλύονται οι BALs Si IV και C IV στον αριθμό συνιστωσών από τις οποίες αποτελούνται, περιοριζόμαστε στη συζήτηση των αποτελεσμάτων ενώ παρέχονται ποιοτικές συγκρίσεις με άλλες μελέτες όπου αυτό είναι εφικτό.

7.2.2. Μεταβολές στις Ακτινικές Ταχύτητες των Συνιστωσών

Όπως είναι εμφανές από την Εικόνα 6.11 οι διπλέτες των Si IV και C IV δεν εμφανίζουν μεταβολές ως προς τις ακτινικές τους ταχύτητες. Συνεπώς, δεν υπάρχουν στοιχεία που να καταδεικνύουν επιτάχυνση η επιβράδυνση του BAL υλικού στην γραμμή παρατήρησης μεταξύ των δύο εποχών. Λαμβάνοντας υπόψη την στατιστική μελέτη των Grier et al. (2016) το εν λόγω αποτέλεσμα θεωρείται αναμενόμενο εξαιτίας του μικρού υπό μελέτης δείγματος και του γεγονότος οι μεταβολές στις ακτινικές ταχύτητες των BALs είναι εξαιρετικά σπάνιες. Σημειώνεται ότι, στον Πίνακα 6.2 μπορεί κανείς να παρατηρήσει συνιστώσες Si IV και C IV οι οποίες επιδεικνύουν μικρές μεταβολές στις ακτινικές τους ταχύτητες. Οι μεταβολές αυτές είναι της τάξης των 200-300 km/s. Επειδή οι τιμές αυτές βρίσκονται εντός του σφάλματος μέτρησης των ακτινικών ταχυτήτων, οι μεταβολές δεν θεωρούνται σημαντικές και οι αντίστοιχες συνιστώσες δεν θεωρούνται ως μεταβαλλόμενες. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα φάσματα των δύο διαφορετικών εποχών προσομοιώνονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και ως αποτέλεσμα η έλλειψη παρατήρησης μεταβολών στις ακτινικές ταχύτητες δεν προκαλείται ανό το και να κροσομοιώνονται ανοιροιών στις ακτινικές τους ταχύτητες των εποχών προσομοιώνονται στη ακτινικές ταχύτητες δεν προκαλείται από την εφαρμογή των κριτηρίων προσομοίωσης.

Επειδή στην μελέτης μας διερευνάται η μεταβλητότητα των συνιστωσών που συνθέτουν τις BALs Si IV και C IV τα αποτελέσματά μας είναι δυνατόν να συγκριθούν μόνο με τις μελέτες των Lu & Lin (2018) και Vilkoviskij & Irwin (2001) οι οποίοι μελετούν μεμονωμένες συνιστώσες των BAL κοιλάδων απορρόφησης. Οι Lu & Lin (2018) ανέλυσαν την BAL Si IV του J002710.06-094435.3 στις συνιστώσες από τις οποίες αποτελείται και δεν παρατήρησαν μεταβολές στις ακτινικές ταχύτητες των συνιστωσών μεταξύ δύο διαφορετικών εποχών. Οι Vilkoviskij & Irwin (2001) μελέτησαν τις διακριτές συνιστώσες Si IV και C IV του BALQSO Q13031+308 και βρήκαν ότι τα νέφη που δημιουργούν τις συνιστώσες απορρόφησης παρουσίασαν αύξησης της ακτινικής τους ταχύτητας κατά ~55 km/s.

7.2.3. Μεταβολές στα Εύρη (FWHM) των Συνιστωσών

Οι συνιστώσες απορρόφησης των Si IV και C IV, κατά κανόνα διατηρούν τα εύρη (FWHM) τους σταθερά (Εικόνα 6.12). Όπως προαναφέρθηκε τα εύρη των συνιστωσών

είναι μεγαλύτερα από τα θερμικά εύρη ενώ παραμένουν ακόμη μεγάλα αν θεωρήσουμε ότι στη διεύρυνση των συνιστωσών συνεισφέρει σημαντικά και η μικρο-τυρβώδης ροή. Ως εκ τούτου προτείναμε (Stathopoulos et al. 2015) τη σύνθετη δομή των συνιστωσών και ως συνεπεία των νεφών απορρόφησης τα οποία θεωρούμε ότι αποτελούνται από επιμέρους δομές. Το γεγονός ότι οι πλατιές συνιστώσες απορρόφησης, προερχόμενες από νέφη, διατηρούν τα εύρη τους σταθερά μεταξύ των δύο εποχών πιθανότατα καταδεικνύει ότι, είτε τα νέφη διατηρούν την εσωτερική τους δομή σταθερή, είτε ότι το πεδίο ταχυτήτων της τυρβώδους ροής παραμένει σταθερό είτε λαμβάνουν χώρα και τα δύο συγχρόνως. Από το σύνολο των διπλετών απορρόφησης των 10 BALQSOs παρατηρήθηκαν 5 από 118 (~4%) διπλέτες C IV οι οποίες μεταβάλλουν το εύρος τους και 12 από 118 (\sim 10%) διπλέτες Si IV με μεταβαλλόμενο εύρος. Η μεταβολή του εύρους συνιστωσών μπορεί να ερμηνευθεί είτε μέσω αλλαγών στην εσωτερική δομή των νεφών είτε εξαιτίας μεταβολών στο πεδίο ταχυτήτων της μικρο-τυρβώδους ροής είτε μέσω ενός συνδυασμού των ανωτέρω μηχανισμών. Σημειώνεται ότι, οι Faucher-Giguére (2012) περιγράφουν έναν μηχανισμό, για τον σχηματισμό των FeLoBALs²⁵ σύμφωνα με τον οποίο, ακτινοβολιακά προκαλούμενα ωστικά κύματα τα οποία διαδίδονται δια μέσω της εκροής κομματιάζουν τα νέφη σε μικρότερα κομμάτια (cloudlets).

7.2.4. Μεταβολές στα Οπτικά Βάθη των Συνιστωσών

Ο κυρίαρχος όγκος της μεταβλητότητας των συνιστωσών απορρόφησης εντοπίζεται στη μεταβολή των οπτικών βαθών (στο κέντρο της γραμμής), καθώς συνιστώσες του Si IV και του C IV ρηχαίνουν ή βαθαίνουν μεταξύ των δύο εποχών (Πίνακας 6.10, Εικόνα 6.13). Επειδή στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι συνιστώσες δεν μεταβάλλουν τα εύρη τους (FWHM) μεταξύ των δύο εποχών, οι μεταβολές των οπτικών βαθών αντικατοπτρίζουν και τις μεταβολές των ισοδύναμων ευρών των συνιστωσών, με εξαίρεση βέβαια εκείνες τις λιγοστές συνιστώσες που μεταβάλουν το εύρος τους.

Όπως είναι εμφανές από τον Πίνακα 6.10 και τα διαγράμματα της Εικόνας 6.13, και στους 10 BALQSOs τόσο στο Si IV όσο και στον C IV μεταβάλλονται μόνο μεμονωμένες συνιστώσες. Δεν παρατηρείται καμία περίπτωση στην οποία να μεταβάλλονται όλες οι συνιστώσες μιας BAL, που σημαίνει ότι καμία BAL δεν μεταβάλει ολόκληρο το προφίλ της μεταξύ των δύο περιόδων. Στις ίδιες ταχύτητες απομάκρυνσης, το Si IV επιδεικνύει μεγαλύτερη εμφάνιση μεταβλητότητας από τον C IV, το οποίο πιθανότατα σχετίζεται με τις διαφορετικές εντάσεις γραμμών μεταξύ των δύο ιόντων. Πιο συγκεκριμένα, στον ίδιο quasar οι συνιστώσες του C IV τείνουν να είναι βαθύτερες από τις αντίστοιχες του Si IV, στην ίδια ταχύτητα. Σύμφωνα με τους Capellupo et al. (2012), οι πιο ασθενείς γραμμές τείνουν να είναι πιο μεταβαλλόμενες. Επίσης, ο C IV είναι συνήθως κορεσμένος με αποτέλεσμα μικρές αλλαγές στην ιονίζουσα ροή ή μικρές μεταβολές στις πυκνότητες στήλης των συνιστωσών να μην είναι παρατηρήσιμες. Επίσης, η μελέτη κατέδειξε ότι είναι πιο πιθανό να μεταβληθεί μία συνιστώσα Si IV όταν η αντίστοιχη συνιστώσα του C IV, στην ίδια ταχύτητα μεταβάλλεται και όχι το αντίστροφο. Το αποτέλεσμα αυτό

²⁵ Οι FeLoBALs είναι μια υποκατηγορία των BALQSOs, οι οποίοι εκτός των BALs C IV, N V, O VI, P V, Si IV, Lya, Mg II, Al III, C II, C III, εμφανίζουν πλατιές κοιλάδες απορρόφησης από χαμηλά ιονισμένο σίδηρο (π.χ. Fe II, Fe III).

ενισχύει το συμπέρασμα ότι οι συνιστώσες του Si IV είναι πιο πιθανό να μεταβάλλονται από ότι οι αντίστοιχες του C IV. Τέλος, κατά τη διερεύνηση της συχνότητας εμφάνισης μεταβλητότητας συναρτήσει της ταχύτητας δεν βρέθηκε κάποια συγκεκριμένη τάση. Δηλαδή, η συχνότητα εμφάνισης μεταβλητότητας είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας απομάκρυνσης των νεφών από την κεντρική πηγή.

Στον J114704.46+153243.3 παρατηρήθηκε μια διπλέτα, μεγάλης ταχύτητας η οποία εξαφανίστηκε από το Si IV και τον C IV στο φάσμα της δεύτερης περιόδου. Σε αντίθεση, στον J101056.69+355833.3 εμφανίστηκαν τόσο στο Si IV όσο και στον C IV δύο πλατιές και ρηχές διπλέτες μεγάλης ταχύτητας. Η εμφάνιση/εξαφάνιση συνιστωσών απορρόφησης μπορεί να οφείλεται σε κινήσεις νεφών τα οποία εισέρχονται/εξέρχονται στην γραμμή παρατήρησης ή σε μεταβολές στην κατάσταση ιονισμού του αερίου. Παρόλα, αυτά και στους δυο quasars καμία συνιστώσα απορρόφησης δεν εμφανίζει μεταβολές ως προς την ακτινική της ταχύτητα. Αν η μεταβλητότητα οφείλονταν σε κινήσεις νεφών εντός ή εκτός της γραμμής παρατήρησης, θα περιμέναμε να παρατηρήσουμε μεταβολές στις ακτινικές ταχύτητες των νεφών, πράγμα που δεν συμβαίνει. Συνεπώς, και στις δύο ανωτέρω περιπτώσεις, η εμφάνιση και εξαφάνιση συνιστωσών είναι πιο πιθανό πως οφείλεται σε μεταβολές στην κατάσταση ιονισμού των απορροφητών.

Όπως προαναφέρθηκε, κανείς από τους μελετώμενους quasars δεν επιδεικνύει μεταβολές σε όλες τις συνιστώσες των BALs Si IV ή C IV. Σύμφωνα με τους Capellupo et al. (2012) όταν η μεταβλητότητα εμφανίζεται σε συγκεκριμένα και περιορισμένα κομμάτια μιας BAL τότε ο υπεύθυνος μηχανισμός είναι οι εγκάρσιες κινήσεις των νεφών εντός της γραμμής παρατήρησης. Επίσης, σημειώνουν ότι οι μεταβολές στον ιονισμό του αερίου θα πρέπει να προκαλούν συνολικές μεταβολές στις BALs και όχι μεταβολές σε μεμονωμένα κομμάτια αυτών. Σύμφωνα με τα ανωτέρω επιχειρήματα, η μεταβλητότητα μεμονωμένων συνιστωσών, η οποία παρατηρήθηκε στο δείγμα μας, φαίνεται να ταιριάζει καλύτερα με την υπόθεση περί κίνησης νεφών εντός της γραμμής παρατήρησης.

Παρόλα αυτά, υπάρχει η πιθανότητα μεταβολές στον ιονισμό του αερίου να μπορούν να προκαλέσουν μεταβολές σε μεμονωμένες συνιστώσες των BALs. Ας υποθέσουμε ότι τα BAL νέφη αποτελούνται από επιμέρους δομές (clumpy clouds), δεν έχουν την ίδια πυκνότητα και ότι ο μηχανισμός που προκαλεί τις παρατηρούμενες μεταβολές είναι η αλλαγή στον αριθμό των φωτονίων που προσπίπτουν στα νέφη. Η παράμετρος ιονισμού, κάθε νέφους, εξαρτάται από το κλάσμα των φωτονίων προς την πυκνότητα και την ακτίνα στο τετράγωνο. Συνεπώς, οι πυκνότερες περιοχές θα χαρακτηρίζονται από μικρότερη παράμετρο ιονισμού και η απόκρισή τους στην αυξανόμενη/μειούμενη ενέργεια των φωτονίων θα είναι λιγότερο ανιχνεύσιμη ή καθόλου ανιχνεύσιμη. Επιπροσθέτως, οι γραμμές απορρόφησης που είναι ιδιαίτερα κορεσμένες είναι λιγότερο ευαίσθητες σε μικρές μεταβολές του ιονισμού. Μία επίσης απλή περίπτωση η οποία μπορεί να εξηγήσει μεταβολές μεμονωμένων συνιστωσών είναι η κάλυψη μεταξύ των νεφών. Ας θεωρήσουμε νέφη απορρόφησης τα οποία θωρακίζονται από άλλα νέφη απορρόφησης τα οποία βρίσκονται πιο κοντά στην μελανή οπή. Τότε, μια μεταβολή στο συνεχές θα έχει πολύ διαφορετικές επιπτώσεις στα εξωτερικά νέφη τα οποία είναι θωρακισμένα. Ως αποτέλεσμα, η μεταβλητότητα μεμονωμένων συνιστωσών δεν μπορεί να μας δώσει απάντηση στο αν η μεταβλητότητα οφείλεται σε κινήσεις νεφών ή σε αλλαγές στην κατάσταση ιονισμού των νεφών. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι στο δείγμα μας δεν παρατηρήσαμε μεταβολές στις ακτινικές ταχύτητες των συνιστωσών. Σε ένα σύνολο 118 διπλετών δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές στις ταχύτητες. Αν οι εγκάρσιες κινήσεις των νεφών ήταν υπεύθυνες για την παρατηρούμενη μεταβλητότητα θα περιμέναμε να παρατηρήσουμε μεταβολές στις ακτινικές ταχύτητες των νεφών κάτι το οποίο δεν συμβαίνει. Συνεπώς, η υπόθεση περί κίνησης νεφών, ως τον κύριο μηχανισμό πρόκλησης της μεταβλητότητας, αποδυναμώνεται.

7.2.4.1. Συντονισμένη μεταβλητότητα

Τα αποτελέσματα κατέδειξαν τρεις διαφορετικούς τύπους συντονισμένης μεταβλητότητας: (1) όλες οι μεταβαλλόμενες συνιστώσες εντός μίας BAL μεταβάλλονται εν φάση (όλες βαθαίνουν ή όλες ρηχαίνουν), (2) εντός του ιδίου quasar, συνιστώσες Si IV και C IV, στις ίδιες ταχύτητες, μεταβάλλονται εν φάση, (3) και τα δύο μέλη μιας διπλέτας (Si IV_{blue} – Si IV_{red}, C IV_{blue} – C IV_{red}) μεταβάλλονται εν φάση. Η πιο πιθανή εξήγηση για τις περιπτώσεις (1) και (2) είναι οι μεταβολές στην κατάσταση ιονισμού του αερίου οι οποίες προκαλούνται από διακυμάνσεις της συνεχούς ακτινοβολίας του quasar (Hamann et al. 2011; Wang et al. 2015; He et al. 2017 και §2.4.1). Όσον αφορά την περίπτωση (3), ανεξάρτητα από τον μηχανισμό πρόκλησης της μεταβλητότητας, είναι λογικό να περιμένουμε συντονισμένες μεταβολές μεταξύ των μελών μιας διπλέται τότε τα δύο μέλη της διπλέτας θα εμφανίζουν συντονισμένη μεταβλητότητα. Επίσης, αν ένα νέφος κινείται εντός ή εκτός της γραμμής παρατήρησης είναι πιθανό να παρατηρούμε συντονισμένες μεταβολές μεταξύ των μελών μιας διπλέτας.

7.2.4.2. Μη-συντονισμένη μεταβλητότητα

Τα αποτελέσματα κατέδειξαν τρεις διαφορετικούς τύπους μη-συντονισμένης μεταβλητότητας: (1) μη-συντονισμένες μεταβολές μεταξύ μεταβαλλόμενων συνιστωσών εντός της ίδιας BAL (κάποιες συνιστώσες βαθαίνουν ενώ άλλες σε διαφορετικές ταχύτητες ρηχαίνουν), (2) μη-συντονισμένες μεταβολές μεταξύ συνιστωσών Si IV και C IV, της ίδιας ταχύτητας, εντός του ιδίου quasar, (3) μησυντονισμένες μεταβολές μεταξύ των μελών μιας διπλέτας (Si IV_{blue} – Si IV_{red}, C IV_{blue} – C IV_{red}). Οι περιπτώσεις (1) και (2) μπορούν να ερμηνευθούν με δύο τρόπους. Η μη- συντονισμένη μεταβλητότητα μπορεί να οφείλεται σε κινήσεις νεφών στην γραμμή παρατήρησης (βλέπε §2.4.2). Όμως, το γεγονός ότι στο δείγμα μας καμία συνιστώσα δεν εμφανίζει μεταβολή ως προς την ακτινική της ταχύτητα αποδυναμώνει την υπόθεση περί κίνησης νεφών εντός/εκτός της γραμμής παρατήρησης (Stathopoulos et al. 2019). Απεναντίας, μη-συντονισμένες μεταβολές είναι δυνατόν να προκληθούν από αλλαγές στην κατάσταση ιονισμού του αερίου, για παράδειγμα εξαιτίας της εξελισσόμενης πυκνότητας του αερίου η οποία οφείλεται στη θερμική αστάθεια (βλέπε §2.4.1 και Waters et al. 2017).

Το πιο απροσδόκητο εύρημα είναι η μη-συντονισμένη μεταβλητότητα μεταξύ των μελών μιας διπλέτας. Μια πιθανή ερμηνεία σε αυτή τη συμπεριφορά μπορεί να προσφέρει το προτεινόμενο φυσικό μοντέλο των Stathopoulos et al. (2015, 2019). Όπως προτάθηκε, νέφη αποτελούν σμήνη από μικρότερες τα και αλληλεπικαλυπτόμενες δομές πλάσματος που καλούνται clumps. Έτσι, κάθε συνιστώσα απορρόφησης που αντιστοιχεί σε ένα νέφος είναι το προϊόν της σύνθεσης στενών συνιστωσών που παράγονται στα clumps (βλέπε §4.2). Προτείνουμε ότι η μησυντονισμένη μεταβλητότητα μεταξύ των μελών μιας διπλέτας μπορεί να οφείλεται σε μεταβολές που επιδεικνύουν τα clumps δηλαδή να οφείλεται σε μεταβολές στην εσωτερική δομή κάθε νέφους (Stathopoulos et al. 2019). Επειδή το μοντέλο μας μελετά τα νέφη και όχι την εσωτερική δομή αυτών, επί του παρόντος, δεν είμαστε σε θέση να μελετήσουμε τις φυσικές συνθήκες των clumps. Επομένως, η ερμηνεία που δίνουμε αποτελεί απλά μια πρόταση. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, ασυνέπειες μεταξύ των οπτικών βαθών των μελών μιας διπλέτας μπορεί να προκληθούν εξαιτίας: (α) φωτονίων των πηγών εκπομπής ακτινοβολίας που δεν απορροφούνται και/ή σκεδάζονται στην γραμμή παρατήρησης, (β) τοπική εκπομπή του απορροφητή και (γ) της μερικής γεωμετρικής κάλυψης της πηγής του συνεχούς και/ή της BEL περιοχής, από τους απορροφητές. Συνεπώς, οι μη-συντονισμένες μεταβολές μεταξύ των μελών μιας διπλέτας μπορεί να προκληθούν από ένα συνδυασμό των ανωτέρω μηχανισμών.

7.3. Μη Ομοιογενής vs Ομαλούς και Ομοιογενούς Εκροής

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έχει αποκαλύψει μια σειρά στοιχείων τα οποία ευνοούν την υπόθεση ότι οι εκροές των quasars δεν είναι ομαλές και ομοιογενείς αλλά στο εσωτερικό τους αναπτύσσονται πυκνώματα (νέφη). Τα στοιχεία που ενισχύουν την άποψη περί νεφών εντός της εκροής είναι τα κάτωθι:

- BALs οι οποίες αποτελούνται από συμπλέγματα συνιστωσών ευνοούν την άποψη ότι τα πλατιά αυλάκια απορρόφησης είναι το προϊόν νεφών τα οποία χαρακτηρίζονται από παρόμοια κινηματική συμπεριφορά, φυσικές συνθήκες και παρόμοιες αποστάσεις από την μελανή οπή. Η δομή της εκροής που στο εσωτερικό της αναπτύσσονται πυκνώματα έχει προταθεί από πολλούς ερευνητές (βλέπε § 1.1).
- 2. Στην εν λόγω μελέτη, τα υπολογιζόμενα εύρη (FWHM) των συνιστωσών απορρόφησης των BALs των Si IV και C IV είναι κατά πολύ μεγαλύτερα από τα θερμικά εύρη. Τα FWHM των συνιστωσών παραμένουν μεγάλα ακόμη και αν θεωρήσουμε ότι στην διεύρυνση των συνιστωσών συνεισφέρει το πεδίο ταχυτήτων της μικρό-τυρβώδους ροής. Οι συνιστώσες που χρησιμοποιούνται, στην εν λόγω μελέτη, για την προσομοίωση των BALs Si IV και C IV, προέρχονται από νέφη πλάσματος και έχουν εύρη μεγαλύτερα από το θερμικό εύρος και το εύρος λόγω μικρό-τυρβώδους ροής. Για να ερμηνευθεί αυτή η ασυνέπεια προτάθηκε (Stathopoulos et al. 2015) ότι τα αποκαλούμενα νέφη είναι σμήνη από μικρότερες υπομονάδες τις οποίες καλούμε clumps.

- 3. Οι συνιστώσες απορρόφησης των BALs Si IV και C IV εμφανίζουν τάση αύξησης του εύρους τους με ταυτόχρονη μείωση του οπτικού τους βάθους αυξανομένης της ακτινικής ταχύτητας απομάκρυνσης. Πιο συγκεκριμένα, στις μικρές ταχύτητες απομάκρυνσης απαντώνται συνιστώσες μεγαλύτερου εύρους αλλά μικρότερου οπτικού βάθους. Όσο η ακτινική ταχύτητα εκροής των νεφών αυξάνεται, αυξάνεται το εύρος των συνιστωσών ενώ συγχρόνως μειώνεται το οπτικό τους βάθους. Στις μεγαλύτερες ακτινικές ταχύτητες εμφανίζονται τα μεγαλύτερα εύρη και τα μικρότερα οπτικά βάθη. Οδηγούμαστε έτσι σε μια επέκταση του φυσικού μοντέλου δομής του περιβάλλοντος της εκροής των quasars. Η εκροή πιο κοντά στο δίσκο χαρακτηρίζεται από έντονη ανομοιογένεια, αποτελούμενη από νέφη μεγαλύτερης πυκνότητας άρα και μεγαλύτερου οπτικού βάθους (έντονη clumping structure). Καθώς η εκροή επιταχύνεται ακτινικά, η πυκνότητα των νεφών μειώνεται αυξανομένης της ταχύτητας και η εκροή τείνει να εξελιχθεί σε ομαλό άνεμο στις μεγάλες ακτινικές ταχύτητες απομάκρυνσης. Επειδή ο clumping wind επεκτεινόμενος τείνει να εξελιχθεί σε ομαλό άνεμο σημαίνει ότι οι συνιστώσες απορρόφησης που αντιστοιχούν σε νέφη θα πρέπει στις μεγάλες ταχύτητες να αποκτούν μικρά οπτικά βάθη και μεγάλα FWHM μέχρι του σημείου που οι συνιστώσες αυτές λόγω μικρού βάθους και μεγάλης έκτασης ουσιαστικά και πρακτικά να εξαφανίζονται εφόσον δεν θα μπορούν να διακριθούν μέσα στο θόρυβο του συνεχούς.
- 4. Στο δείγμα των 10 quasars εμφανίζεται μεταβλητότητα στα οπτικά βάθη μόνο σε μεμονωμένες συνιστώσες των BALs. Κανένας από τους 10 quasars δεν εμφανίζει μεταβολές στα οπτικά βάθη όλων των συνιστωσών που συνθέτουν μία BAL. Όλες οι συνιστώσες του υπό μελέτη δείγματος μεταβάλλονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Δηλαδή, τα νέφη απορρόφησης μεταβάλλονται ανεξάρτητα. Η συμπεριφορά αυτή αποτελεί ένδειξη της διακριτότητας και ανεξαρτησίας μεταξύ των νεφών.
- 5. Η μη συντονισμένη μεταβλητότητα μεταξύ των μελών μιας διπλέτας συντονισμού συνηγορεί υπέρ μιας ασταθούς εκροής στο εσωτερικό της οποίας εμφανίζονται νέφη.
- 6. Στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων τα δύο μέλη των διπλετών των ιόντων Si IV και C IV εμφανίζουν αποκλίσεις του λόγου τ_b/τ_r από την θεωρητικά αναμενόμενη τιμή. Επίσης, εντός της ίδιας BAL παρατηρούνται διπλέτες, σε διαφορετικές ταχύτητες οι οποίες χαρακτηρίζονται από διαφορετικούς λόγους τ_b/τ_r. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι η δομή της εκροής δεν είναι ομαλή αλλά στο εσωτερικό της αναπτύσσονται πυκνώματα σε διαφορετικές ταχύτητες (σε διαφορετικές αποστάσεις από την μελανή οπή) τα οποία χαρακτηρίζονται από διαφορετικούς συντελεστές κάλυψης.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

8.1. Εισαγωγή

Στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση και μελέτη των BALs Si IV και C IV στο δείγμα των 20 BALQSOs. Μέσω των συμπερασμάτων παρέχονται απαντήσεις στα ανοιχτά ερωτήματα, που τίθενται στον Πρόλογο της διατριβής, των οποίων η διερεύνηση αποτελεί σκοπό της εν λόγω μελέτης.

Για την προσομοίωση και ανάλυση των BALs Si IV και C IV, στις συνιστώσες από τις οποίες αποτελούνται, επιλέχθηκε το μοντέλο GR (Danezis et al. 2003, 2007, 2009, Lyratzi et al. 2007, 2009) το οποίο:

- Επιλύει την εξίσωση διάδοσης ακτινοβολίας για σύνθετο περιβάλλον πλάσματος το οποίο αποτελείται από την πηγή της συνεχούς ακτινοβολίας που διαδίδεται μέσω διακριτών πυκνωμάτων εκπομπής και απορρόφησης, τα οποία εδράζονται στη γραμμή παρατήρησης. Από την επίλυση της εξίσωσης διάδοσης προκύπτει η τελική συνάρτηση παρεμβολής η οποία παρεμβαλλόμενη στα σημεία του φάσματος μπορεί να διαχωρίσει και προσομοιώσει με ακρίβεια τόσο τις BALs όσο και τις BELs. Πέραν της προσομοίωσης του συνολικού προφίλ των BALs και BELs, η τελική συνάρτηση παρεμβολής παρέχει την ανάλυση των πλατιών γραμμών απορρόφησης και εκπομπής στις επιμέρους συνιστώσες από τις οποίες αποτελούνται. Σημειώνεται ότι η τελική συνάρτηση παρεμβολής πολλές φορές συνηθίζεται, σε αντίστοιχες περιπτώσεις άλλων αστρικών αντικειμένων (απαντήσεις στα Ερωτήματα 1 και 3, βλέπε § 4.3.1 και Εξίσωση 4.1).
- Στην περίπτωση γραμμών συντονισμού, όπως αυτές των Si IV και C IV, το εν λόγω μοντέλο προσφέρει τη δυνατότητα διαχωρισμού των δύο μελών μιας διπλέτας αντιμετωπίζοντάς τες ως δύο ξεχωριστές φασματικές γραμμές και όχι ως μία μονήρη γραμμή (απάντηση στο ερώτημα Ερώτημα 4, βλέπε § 4.3.1).
- Στην περίπτωση που σε μία φασματική περιοχή δημιουργούνται περισσότερες της μίας BAL, το μοντέλο παρέχει την σύνθετη συνάρτηση παρεμβολής η οποία δίνει την καλύτερη δυνατή προσαρμογή ολόκληρης της φασματικής περιοχής (απάντηση στο Ερώτημα 5, βλέπε § 4.3 και Εικόνα 6.2).
- Παρέχει τη δυνατότητα της ταυτόχρονης ανάλυσης περισσότερων του ενός ιόντος με αποτέλεσμα να καθίσταται εφικτή η μελέτη μας εκτενούς φασματικής περιοχής η οποία επιδεικνύει BALs και BELs διαφορετικών ιόντων (απάντηση στο Ερώτημα 6, βλέπε § 4.3.4).

Η ανάλυση μιας σύνθετης και περίπλοκης γραμμής απορρόφησης, σε επιμέρους συνιστώσες, είναι μια αμφιλεγόμενη διαδικασία. Το μεγαλύτερο πρόβλημα της καλύτερης προσαρμογής μιας BAL μέσω πολλαπλών συνιστωσών είναι ότι η τελική προσαρμογή ενδέχεται να μην είναι μοναδική. Αυτό θα έχει ως συνέπεια η καλύτερη δυνατή προσαρμογή της συνολικής BAL, ο αριθμός των συνιστωσών από τις οποίες αποτελείται και οι τιμές των υπολογιζόμενων φυσικών παραμέτρων να είναι εκφυλισμένα, δηλαδή να μην είναι μοναδικώς καθορισμένα. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα προτείναμε (Stathopoulos et al. 2015, 2019) την ταυτόχρονη ανάλυση των BALs δύο διαφορετικών ιόντων (Si IV, C IV) κάτω από μία σειρά αυστηρών κριτηρίων τα οποία εξασφαλίζουν ότι: α) η τελική καλύτερη δυνατή προσαρμογή των BALs Si IV και C IV είναι μοναδικά καθορισμένη, β) ο αριθμός των συνιστωσών από τις οποίες αποτελούνται οι BALs Si IV και C IV είναι μοναδικά καθορισμένος και γ) οι τιμές των υπολογιζόμενων παραμέτρων είναι μοναδικά καθορισμένες (απαντήσεις στα Ερωτήματα 6 και 7, βλέπε § 4.3.4). Τα κριτήρια και η μέθοδος προσομοίωσης των BALs Si IV και C IV παρουσιάζονται στις παραγράφους 4.3.4 και 5.5.3.1 αντίστοιχα.

8.2. Συμπεράσματα από τη μελέτη των 20 BALQSOs

Στο πρώτο μέρος της εν λόγω μελέτης πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή των κριτηρίων προσομοίωσης των Stathopoulos et al. (2015) κατά τη διαδικασία προσομοίωσης, μέσω πολλαπλών συνιστωσών, των BALs Si IV και C IV στην περίπτωση 20 BALQSOs (απάντηση στο Ερώτημα 2, βλέπε Εικόνες 6.1, 6.2, Πίνακες 6.2-6.9). Σημειώνεται εντός του δείγματος των 20 quasars δεν απαντάται μόνο ένα είδος BAL προφίλ αλλά εμφανίζεται όλο το εύρος των δυνατών προφίλ που μπορεί να επιδεικνύουν οι BALQSOs. Για τις προσομοιώσεις των BALs Si IV και C IV, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ASTA (Tzimeas et al. 2019) το οποίο ενσωματώνει το μοντέλο GR (Danezis et al. 2003a, 2007, 2009, Lyratzi et al. 2007, 2009) και τα κριτήρια προσομοίωσης (Stathopoulos et al. 2015, 2019). Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο GR έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στην περίπτωση των θερμών αστέρων εκπομπής (βλέπε § 2.2 και Antoniou et al. 2014 και αναφορές εντός). Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το εν λόγω μοντέλο στην περίπτωση των quasars είναι επειδή έχει διαπιστωθεί ότι όλες οι προσπάθειες μοντελοποίησης των BALs και των εκροών των quasars έχουν τις ρίζες τους στην μοντελοποίηση των ανέμων των θερμών αστέρων (βλέπε § 2.2). Έτσι στην εν λόγω διατριβή εφαρμόστηκε στην περίπτωση των BALs το μοντέλο GR το οποίο αποτελεί ένα μοντέλο νεφών που αρχικά κατασκευάστηκε για την μοντελοποίηση των γραμμών εκπομπής και απορρόφησης των θερμών αστέρων εκπομπής. Οι προσομοιώσεις κατέδειξαν ότι:

 Τα κριτήρια (Stathopoulos et al. 2015) εφαρμόστηκαν με πλήρη συνέπεια και επιτυχία στην προσομοίωση των BALs Si IV και C IV (απάντηση στο Ερώτημα 7: βλέπε Εικόνα 6.3 και Πίνακες 6.2-6.4, 6.6-6.8) των 20 BALQSOs. Η εξαιρετικά υψηλή ποιότητα των προσομοιώσεων και η μοναδικότητα αυτών (απάντηση στο Ερώτημα 7: βλέπε Κριτήρια Fitting § 4.3.4), κατέδειξαν πως οι BALs Si IV και C IV είναι το προϊόν σύνθεσης στενών συνιστωσών απορρόφησης (στενών ως προς το εξαιρετικά μεγάλο εύρος των BALs), γεγονός που καταδεικνύει ότι οι BAL εκροές δεν είναι ομαλές και ομοιογενείς αλλά στο εσωτερικό τους υπάρχουν διακριτές δομές πλάσματος (νέφη) οι οποίες είναι υπεύθυνες για την δημιουργία των BALs (απαντήσεις στα Ερωτήματα 2 και 3: βλέπε Κεφάλαιο 4).

- 2. Το γεγονός ότι οι BALs των Si IV και C IV εκτείνονται στο ίδιο εύρος ταχυτήτων και αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών απορρόφησης (βλέπε Εικόνα 6.3 και Πίνακες 6.2-6.9) καταδεικνύει ότι τα δύο ιόντα είναι κομμάτι της ίδιας εκροής, ότι εκρέουν από την ίδια περιοχή και ότι τα νέφη απορρόφησης περιέχουν και τα δύο ιόντα (απαντήσεις στα Ερωτήματα 8, 9 και 10: βλέπε § 7.1). Τα νέφη πλάσματος χαρακτηρίζονται από παρόμοιες αποστάσεις από την μελανή οπή (βρίσκονται πολύ κοντά στο χώρο των ταχυτήτων), παρόμοια κινηματική συμπεριφορά και φυσικές συνθήκες (απαντήσεις στα Ερωτήματα 10 και 11: βλέπε § 7.1, Πίνακες 6.2-6.9).
- 3. Οι συνιστώσες στις οποίες έχουν αναλυθεί οι BALs των Si IV και C IV προέρχονται από διακριτά νέφη απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης και έχουν εύρη (FWHM) μεγαλύτερα από το θερμικό εύρος των αντίστοιχων φασματικών γραμμών. Ακόμη και αν θεωρήσουμε ότι στη διεύρυνση των φασματικών γραμμών Si IV και C IV συνεισφέρει το πεδίο ταχυτήτων της μικρό-τυρβώδους ροής, τα εύρη των συνιστωσών των BALs παραμένουν μεγαλύτερα. Προκειμένου να ερμηνευθεί αυτή η ασυνέπεια προτείναμε (Stathopoulos et al. 2015) ότι τα νέφη αυτά αποτελούν σμήνη συγκεντρώσεις μικρότερων δομών τα οποία καλούνται μικρά νέφη (cloudlets) ή clumps (απάντηση στο Ερώτημα 8: βλέπε § 4.2). Την άποψη αυτή έχουν διατυπώσει θεωρητικά οι Bottorff et al. (2000); Bottorff & Ferland (2000, 2001, 2002) και αφορά τα νέφη της BEL περιοχής (κάθε νέφος είναι μια συλλογή αλληλεπικαλυπτόμενων, πυκνωμάτων, σταθερής πυκνότητας τα οποία καλούνται cloudlets). Σημειώνεται ότι οι Stathopoulos et al. (2015) για πρώτη φορά επιβεβαίωσαν αυτή την άποψη για τα νέφη της BAL περιοχής μέσω μιας φασματοσκοπικής ανάλυσης των BALs.
- 4. Ο μηχανισμός δημιουργίας των BALs και το φυσικό μοντέλο της BAL περιοχής έχουν ως εξής: κάθε clump παράγει μια γραμμή απορρόφησης το εύρος της οποίας εξαρτάται από τις θερμικές και μη θερμικές κινήσεις (microturbulence) των ιόντων εκάστου clump. Οι γραμμές απορρόφησης των clumps βρίσκονται πολύ κοντά στο χώρο των ταχυτήτων με αποτέλεσμα να επικαλύπτονται και να δημιουργούν πλατιές γραμμές απορρόφησης που αντιστοιχούν σε νέφη. Οι πλατιές γραμμές απορρόφησης του μεγάλου εύρους τους, με τη σειρά τους μπλέκονται μεταξύ τους δημιουργώντας τις πλατιές κοιλάδες απορρόφησης που καλούνται BALs (απάντηση στο Ερώτημα 11: βλέπε § 4.2).
- 5. Εντός του ίδιου BALQSO και σε ίδιες ταχύτητες από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής, τα εύρη των συνιστωσών απορρόφησης του C IV είναι μεγαλύτερα από τα εύρη των συνιστωσών απορρόφησης του Si IV. Ο λόγος των ευρών βρέθηκε ότι είναι < $FWHM_{CIV}/FWHM_{SIIV} >= 1.37 \pm 0.22$ (απάντηση στο Ερώτημα 13: βλέπε Εικόνα 6.7)
- 6. Οι συνιστώσες απορρόφησης στις μεγάλες ακτινικές ταχύτητες χαρακτηρίζονται από μεγάλα FWHM και μικρά οπτικά βάθη. Σε αντίθεση οι συνιστώσες στις μικρές ταχύτητες εκροής χαρακτηρίζονται από μικρά FWHM και μεγάλα οπτικά βάθη. Οδηγούμαστε έτσι σε μια επέκταση του φυσικού μοντέλου δομής του περιβάλλοντος της εκροής των quasars. Η εκροή πιο κοντά στο δίσκο χαρακτηρίζεται από έντονη ανομοιογένεια, αποτελούμενη από νέφη μεγαλύτερης

πυκνότητας άρα και μεγαλύτερου οπτικού βάθους (έντονη clumping structure). Καθώς η ροή επιταχύνεται ακτινικά, η πυκνότητα των νεφών μειώνεται αυξανομένης της ταχύτητας και η εκροή τείνει να εξελιχθεί σε ομαλό άνεμο στις μεγάλες ακτινικές ταχύτητες απομάκρυνσης. Επειδή ο clumping wind επεκτεινόμενος τείνει να εξελιχθεί σε ομαλό άνεμο σημαίνει ότι οι συνιστώσες απορρόφησης που αντιστοιχούν σε νέφη θα πρέπει στις μεγάλες ταχύτητες να αποκτούν μικρά οπτικά βάθη και μεγάλα FWHM μέχρι του σημείου που οι συνιστώσες αυτές λόγω μικρού βάθους και μεγάλης έκτασης ουσιαστικά και πρακτικά να εξαφανίζονται εφόσον δεν θα μπορούν να διακριθούν μέσα στο θόρυβο του συνεχούς (απάντηση στο **Ερώτημα 8: βλέπε Εικόνες 6.4-6.6**).

- 7. Οι λόγοι των οπτικών βαθών τ_b/τ_r μεταξύ των γραμμών συντονισμού μιας διπλέτας, τόσο στο Si IV όσο και στον C IV αποκλίνουν από τον θεωρητικό λόγο ο οποίος είναι 2/1 (βλέπε Εικόνα 6.9). Το αποτέλεσμα αυτό καταδεικνύει ότι οι απορροφητές του Si IV και του C IV καλύπτουν μερικώς την πηγή του συνεχούς ή/και την BEL περιοχή. Το γεγονός ότι στον ίδιο BALQSO για συνιστώσες Si IV και C IV στην ίδια ακτινική ταχύτητα από την αντίστοιχη γραμμή εκπομπής ισχύει τ_b/τ_r (Si IV) ≠ τ_b/τ_r(C IV) καταδεικνύει ότι τα δύο ιόντα χαρακτηρίζονται από διαφορετικό συντελεστή κάλυψης. Δεχόμενοι την άποψη ότι τα δύο ιόντα είναι κομμάτι της ίδιας εκροής και ότι μιας και ένα νέφος απορρόφησης περιέχει Si IV και C IV, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι το Si IV είναι δυνατόν να καταλαμβάνει διαφορετική έκταση επί του νέφους απορρόφησης από ότι ο C IV, δηλαδή τα δύο ιόντα δεν είναι ισοκατανεμημένα εντός των νεφών απορρόφησης (απαντήσεις στα Ερωτήματα 9 και 13: βλέπε Κεφάλαιο 7).
- 8. Αν θεωρηθούν ηλιακές αφθονίες, τότε ο C IV είναι πιο άφθονος από το Si IV. Συνεπώς θα περιμέναμε εντός του ίδιου BALQSO συνιστώσες Si IV και C IV στην ίδια ταχύτητα να χαρακτηρίζονται από τ_{SiIV} > τ_{CIV} (βλέπε Εικόνα 6.8). Παρόλα αυτά παρατηρούνται περιπτώσεις (αποτελούν μειοψηφία) στις οποίες ισχύει το αντίστροφο. Το γεγονός αυτό μπορεί να ερμηνευθεί είτε θεωρώντας ότι δεν ισχύουν οι ηλιακές αφθονίες είτε ότι ο συντελεστής κάλυψης του Si IV είναι μεγαλύτερος από του C IV. Βέβαια, δεν μπορεί να αποκλειστεί ένας συνδυασμός των ανωτέρω (απάντηση στο Ερώτημα 13: βλέπε § 7.1).
- 9. Σε ποσοστό ~80% εντός του ιδίου quasar, οι διπλέτες απορρόφησης του C IV εμφανίζουν πιο έντονη απορρόφηση από τις αντίστοιχες διπλέτες του Si IV, στην ίδια ταχύτητα. Δηλαδή οι απορροφήσεις του Si IV είναι γενικά πιο ασθενείς από αυτές του C IV (απάντηση στο Ερώτημα 13: βλέπε Εικόνα 6.10).

8.3. Συμπεράσματα από τη μελέτη μεταβλητότητας

Σε δέκα εκ των είκοσι BALQSOs μελετήθηκε η μεταβλητότητα των συνιστωσών από τις οποίες αποτελούνται οι BALs Si IV και C IV, μεταξύ δύο διαφορετικών εποχών. Δηλαδή μελετήθηκε η μεταβλητότητα των φυσικών παραμέτρων των νεφών απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης που δημιουργούν τις BALs. Η χρονική διαφορά μεταξύ των δύο εποχών κυμαίνεται μεταξύ έξι και δεκατριών ετών. Τα αποτελέσματα της μελέτης είναι τα κάτωθι:

- Δεν παρατηρούνται μεταβολές ως προς τις ακτινικές ταχύτητες των συνιστωσών απορρόφησης των Si IV και C IV (Stathopoulos et al. 2019). Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι δεν παρατηρούνται επιταχύνσεις ή επιβραδύνσεις των νεφών απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης μεταξύ των δύο εποχών (απάντηση στο Ερώτημα 12: βλέπε Εικόνα 6.11 και § 7.2.2).
- 2. Στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, μεταξύ των δύο εποχών, οι συνιστώσες απορρόφησης των Si IV και C IV δεν μεταβάλλουν τα εύρη τους. Το αποτέλεσμα αυτό σημαίνει ότι μεταξύ των δύο περιόδων παρατήρησης είτε τα νέφη διατηρούν την εσωτερική τους δομή σταθερή, είτε ότι το πεδίο ταχυτήτων της μικρο-τυρβώδους ροής παραμένει σταθερό ή και τα δύο. Οι λίγες περιπτώσεις στις οποίες παρατηρούνται συνιστώσες με μεταβαλλόμενα εύρη καταδεικνύουν μεταβολές στην εσωτερική δομή των νεφών. Συνεπώς τα νέφη δεν είναι συμπαγείς δομές αλλά σμήνη από μικρότερους σχηματισμούς/πυκνώματα 12 και 9: βλέπε Εικόνα 6.12 και § 7.2.3).
- 3. Όπως προαναφέρθηκε, οι BALs Si IV και C IV αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό συνιστωσών οι οποίες προέρχονται από νέφη εντός της εκροής ενώ και τα δύο ιόντα ανήκουν στα ίδια νέφη. Η εμφάνιση μεταβλητότητας των συνιστωσών απορρόφησης των Si IV και C IV εντοπίζεται κυρίως σε αλλαγές στο οπτικό βάθος των συνιστωσών, με τις συνιστώσες να βαθαίνουν ή να ρηχαίνουν μεταξύ των δύο εποχών. Η μεταβλητότητα εμφανίζεται σε μεμονωμένες συνιστώσες των BALs Si IV και C IV. Καμία BAL δεν εμφανίζει μεταβολή σε όλες τις συνιστώσες της. Οι συνιστώσες απορρόφησης των BALs Si IV και C IV εντοπίζεται το μεταβολή σε όλες τις συνιστώσες της. Οι συνιστώσες απορρόφησης των BALs Si IV και C IV εμφανίζουν ανεξάρτητες μεταβολές το οποίο αποτελεί ένδειξη της διακριτότητας και ανεξαρτησίας των νεφών μεταξύ τους (Stathopoulos et al. 2019). Όλα τα ανωτέρω αποτελούν ισχυρές ενδείξεις της ύπαρξης δομών πλάσματος υποδεικνύοντας ότι οι εκροές δεν είναι ομαλές και ομοιογενείς (Stathopoulos et al. 2019), (απάντηση στα Ερωτήματα 2 και 8: βλέπε § 7.3).
- 4. Όσον αφορά τον μηχανισμό πρόκλησης της μεταβλητότητας, τα αποτελέσματά μας ευνοούν την υπόθεση περί μεταβολών στην κατάσταση ιονισμού των νεφών έναντι της κίνησης των νεφών εντός και εκτός της γραμμής παρατήρησης, δεδομένου ότι δεν παρατηρούνται μεταβολές στις ακτινικές ταχύτητες των νεφών. Εντούτοις η συνεισφορά από άλλους μηχανισμούς δεν μπορεί να εξαιρεθεί δεδομένου του μικρού δείγματος των 10 quasars (Stathopoulos et al. 2019), (απάντηση στο Ερώτημα 12: βλέπε § 7.2.4).
- 5. Κατά τη διερεύνηση της συχνότητας εμφάνισης μεταβλητότητας συναρτήσει της ταχύτητας δεν βρέθηκε κάποια συγκεκριμένη τάση. Παρατηρήθηκε ότι η συχνότητα εμφάνισης μεταβλητότητας είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας απομάκρυνσης των νεφών από την κεντρική πηγή (Stathopoulos et al. 2019), (απάντηση στο Ερώτημα 13: βλέπε Εικόνα 6.14).
- 6. Παρατηρήθηκε πως το Si IV χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης μεταβλητότητας από ότι ο C IV. Το αποτέλεσμα αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι στον ίδιο BALQSO και στην ίδια ταχύτητα α) οι γραμμές του Si IV είναι, στην πλειοψηφία τους ασθενέστερες από τις συνιστώσες του C IV ενώ ο C IV είναι πιο πιθανό να είναι κορεσμένος. Κατά τη διερεύνηση της συχνότητας εμφάνισης μεταβλητότητας συναρτήσει της ταχύτητας δεν βρέθηκε κάποια συγκεκριμένη τάση. Παρατηρήθηκε ότι η συχνότητα εμφάνισης μεταβλητότητας είναι

ανεξάρτητη της ταχύτητας απομάκρυνσης των νεφών από την κεντρική πηγή (απάντηση στο Ερώτημα 13: βλέπε Εικόνες 6.14, 6.15 και § 7.2.4).

7. Τέλος, σημειώνεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος ανάλυσης των BALs Si IV και C IV στις συνιστώσες από τις οποίες αποτελούνται προσφέρει μια αξιόπιστη και ακριβή μέθοδο ανάλυσης της «clumpy» εκροής και της ανεξάρτητης μελέτης των νεφών απορρόφησης στη γραμμή παρατήρησης.

8.4. Μελλοντικό έργο

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να αναφέρουμε κάποιες σκέψεις που αφορούν μελλοντικούς ερευνητικούς στόχους. Η παρούσα μελέτη δεν αποτελεί το τέλος, αλλά εν αντιθέσει αποτελεί βασικό υπόβαθρο μελλοντικής ερευνητικής δραστηριότητας όσον αφορά μια σειρά προβλημάτων που εμφανίζονται στους BALQSOs καθώς και σε άλλα αστρονομικά σώματα όπως είναι οι θερμοί αστέρες, οι αστέρες Wolf Rayet, οι κατακλυσμιαίοι μεταβλητοί αστέρες κ.α. Πιο συγκεκριμένα, οι μελλοντική στόχοι είναι:

- 1. Δημοσίευση εργασίας με τα στατιστικά αποτελέσματα από τη μελέτη των 20 BALQSOs.
- 2. Δημοσίευση εργασίας με τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την προσομοίωση των BELs Si IV και C IV.
- Δημοσίευση εργασίας που αφορά τη μελέτη των αναλογιών μεταξύ των γραμμών απορρόφησης των BALQSOs, Hot Stars, Wolf Rayet, Cataclysmic Variables, η οποία είναι σε τελικό στάδιο.
- 4. Να επεκταθεί η εφαρμογή των κριτηρίων προσομοίωσης, εκτός από τα ιόντα Si IV και C IV, και στα ιόντα N V, Lyα, Mg II, P V και O VI.
- 5. Η μελέτη των πυκνοτήτων στήλης των ανωτέρω ιόντων λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της μερικής κάλυψης της πηγής του συνεχούς και/ή της BELR από τους απορροφητές. Έλεγχος των μοντέλων ομοιογενούς μερικής κάλυψης και ανομοιογενούς μερικής κάλυψης.
- 6. Σε συνδυασμό με το (5) να γίνει ο υπολογισμός των συντελεστών κάλυψης της πηγής του συνεχούς και/ή της BELR στα πλαίσια των δύο μοντέλων μερικής κάλυψης που αναφέρθηκαν ανωτέρω.
- Να γίνει μελέτη των φυσικών παραμέτρων της BAL και BEL περιοχής συναρτήσει της ερυθρομετάθεσης.
- 8. Να μελετηθεί η μεταβλητότητα των BALs N V, Lyα, Mg II, P V και Ο VI.
- 9. Να μελετηθούν οι BELs των υπολοίπων ιόντων, δηλαδή των Ν V, Lyα, Mg II, P V και Ο VI.
- 10. Να μελετηθεί η μεταβλητότητα των BELs.
- 11. Όλα τα ανωτέρω να πραγματοποιηθούν για μεγαλύτερο δείγμα BALQSOs.

Παράρτημα

Στους πίνακες 6.2-6.5 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων που υπολογίζονται από τις προσομοιώσεις στην περίπτωση των 10 BALQSOs που μελετώνται ως προς τη μεταβλητότητά τους, μεταξύ δύο περιόδων.

Πίνακας 6.2. Ταχύτητες απομάκρυνσης (V_{rad} σε km/s) των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του C IV και του Si IV, και για τις δύο χρονικές περιόδους. Για κάθε BALQSO δίνονται: στην 1^η στήλη ο αύξον αριθμός των συνιστωσών στις οποίες έχουν αναλυθεί οι BALs των Si IV και C IV, στις στήλες 2-5 δίνονται οι τιμές των ταχυτήτων των μπλε και κόκκινων συνιστωσών απορρόφησης του C IV και για τις δύο χρονικές περιόδους, στις στήλες 6-9δίνονται οι τιμές των ταχυτήτων των μπλε και κόκκινων συνιστωσών απορρόφησης του Si IV και για τις δύο χρονικές περιόδους, στην 10^η στήλη δίνεται, για κάθε συνιστώσα απορρόφησης, η μέση τιμή μεταξύ όλων των ταχυτήτων.

				1. J114548.3	8+393746.6				
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2n	d epoch	
Component	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	< Vrad >
1	-3980±70	-3960 ± 70	-4020 ± 70	-3980 ± 70	-3940 ± 70	-3940 ± 70	-3950 ± 70	-3990±140	-3970±330
2	-4770 ± 70	-4730 ± 70	-4790 ± 140	-4790 ± 70	-4760 ± 70	-4810 ± 70	-4820 ± 70	-4830±210	-4790 ± 310
3	-5360 ± 140	-5340 ± 140	-5340 ± 70	-5340 ± 140	-5210±140	-5240 ± 140	-5300 ± 140	-5270±140	-5300±380
4	-5670±70	-5690 ± 70	-5730±70	-5750 ± 70	-5670±70	-5670 ± 70	-5700 ± 70	-5650±210	-5690±210
5	-5990±210	-5990±210	-5950 ± 70	-5930±210	-5870±210	-5870±210	-5950±210	-5920 ± 70	-5930±520
6	-6500±70	-6480±70	-6420±210	-6460±70	-6420±70	-6370 ± 70	-6460±70	-6450 ± 70	-6450±210
7	-6880 ± 140	-6800±140	-6880±140	-6920±140	-6900±140	-6900±140	-6950±140	-6900±140	-6890±400
8	-7650±140 -7650±140 -7630±210 -7650±14				-7650±140	-7690±140	-7720±140	-7730±140	-7670±430
				2. J101056.6	69+355833.3				
	C IV 1st epoch C IV 2nd epoch Si IV 1st epoch Si IV 2nd epoch								

Component	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	< Vrad >						
1	-3450±70	-3510±140	-3450 ± 140	-3490±140	-3490±140	-3510±70	-3440±140	-3490±140	-3480±360
2	-4000 ± 70	-4000 ± 140	-4000±140	-4000±70	-3920 <u>±</u> 140	-3970 <u>+</u> 70	-3990 <u>+</u> 70	-3940 <u>±</u> 140	-3980 <u>+</u> 310
3	-4790 ± 140	-4790±210	-4820±140	-4840±140	-4820±210	-4730±140	-4880±140	-4820±140	-4810±450
4	-5570±70	-5550 ± 140	-5570±210	-5570 ± 140	-5630±140	-5560±70	-5610±140	-5580±210	-5580±420
5	-6290±210	-6290±210	-6300±140	-6300±210	-6330 <u>+</u> 210	-6260 <u>+</u> 210	-6370±210	-6350±140	-6310 <u>+</u> 550
6	-7340 <u>+</u> 70	-7370 <u>±</u> 140	-7410 <u>+</u> 210	-7410 <u>+</u> 210	-7360 <u>+</u> 140	-7410 <u>+</u> 70	-7450 <u>±</u> 210	-7470 <u>+</u> 210	-7400 <u>+</u> 470
7	-8290±140	-8290±70	-8310 <u>+</u> 210	-8290 <u>+</u> 210	-8290 <u>+</u> 70	-8340 <u>+</u> 140	-8340±210	-8360±210	-8310 <u>+</u> 470
8	-8830±140	-8830±140	-8830 <u>+</u> 140	-8830±140	-8840 <u>+</u> 140	-8800 <u>+</u> 140	-8820±140	-8800±140	-8820±400
9	-9330 <u>+</u> 70	-9330±140	-9310 <u>+</u> 70	-9310 <u>+</u> 70	-9400 <u>±</u> 140	-9380 <u>+</u> 70	-9380 <u>+</u> 70	-9350 <u>+</u> 70	-9350 <u>+</u> 260
10	-10010±210	-10010 <u>+</u> 210	-10110 <u>+</u> 210	-10110 <u>+</u> 210	-9910 <u>+</u> 210	-9950 <u>+</u> 210	-10040 <u>+</u> 210	-10040 <u>+</u> 210	-10020 <u>+</u> 590
11	n/a	n/a	-12560 <u>+</u> 210	-12560 <u>+</u> 210	n/a	n/a	-12290 <u>+</u> 210	-12290 <u>+</u> 210	-12410±570
12	n/a	n/a	-15540 <u>+</u> 210	-15540 <u>+</u> 210	n/a	n/a	-15120 <u>+</u> 140	-15120 <u>+</u> 140	-15330±400
				3. J114704.4	6+153243.3				
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Si IV 1s	t epoch	Si IV 2n	d epoch	
Component	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	< Vrad >						
1	-1830 ± 140	-1830±210	-1870 ± 140	-1870 ± 140	-1840 ± 210	-1790±210	-1840 ± 140	-1790±210	-1830±500
2	-2330±140	-2330±210	-2330±210	-2330±140	-2330±140	-2380±140	-2330±210	-2380±210	-2340 ± 500
3	-2820±140	-2820±70	-2840 ± 140	-2860±210	-2770±210	-2700±210	-2770±140	-2700 ± 140	-2790±530
4	-3510±210	-3570±70	-3490±140	-3590±210	-3550±210	-3550±210	-3550±140	-3570±140	-3550 ± 560
5	-4120±210	-4080±210	-4120±210	-4060±140	-4140±140	-4100±140	-4120±210	-4050 ± 140	-4100 ± 500
6	-4650 ± 140	-4650 ± 140	-4650 ± 210	-4650 ± 140	-4640 ± 210	-4710 ± 140	-4660±210	-4710 ± 140	-4670±480
7	-5300±70	-5320±210	-5320 ± 140	-5320±140	-5360 ± 140	-5360±210	-5390±140	-5360 ± 210	-5340 ± 500
8	-5730±140	-5770±210	-5730±140	-5770±140	-5820±140	-5800±210	-5780±140	-5800±210	-5780±510
9	-6190±140	-6170±140	-6190±140	-6170±210	-6090±210	-6110±140	-6110±140	-6150±140	-6150±450
10	-6640 ± 70	-6640±210	-6640 ± 140	-6660 ± 140	-6680±210	-6620±140	-6640 ± 140	-6590 ± 140	-6640 ± 440

11	-7650±210	-7630±140	-7630±210	-7630 ± 140	-7630±140	-7610±140	-7630±210	-7610±140	-7630±480
12	-8410±210	-8410±140	-8430±210	-8430±210	-8400±140	-8360±140	-8420±140	-8360±140	-8400±480
13	-9150±70	-9130±210	-9130±140	-9130±210	-9130±140	-9130±210	-9130±140	-9130±210	-9130±490
14	-9850±70	-9850±210	-9850±140	-9850±140	-9930±140	-9870±210	-9930±210	-9870±140	-9880±460
15	-11030±210	-11010±140	-11050 ± 140	-11010±140	-11090±210	-11020±140	-11040±210	-11040±210	-11040 ± 540
16	-11810±140	-11790±140	-11810±140	-11810±140	-11850±210	-11850±140	-11830±140	-11830±140	-11820±430
17	-12380±210	-12380±140	-12380±210	-12380±210	-12410±140	-12410±140	-12410±140	-12410±210	-12400±540
18	-12560±210	-12560 ± 140	-12580±140	-12560±210	-12560±70	-12560 ± 140	-12560 ± 140	-12560 ± 140	-12560 ± 470
19	-13120±140	-13100±210	-13120±210	-13120±140	-13170±140	-13190±210	-13170±140	-13190±140	-13150±510
20	-14260 ± 210	-14260 ± 210	-14260±210	-14260 ± 140	-14180 ± 140	-14180 ± 140	-14200±210	-14180±210	-14220±560
21	-15680 ± 140	-15620±140	?	?	-15450±70	-15560±210	?	?	-15580±350
22	-16190±210	-16190±70	-16190±210	-16190 ± 210	-16170 ± 140	-16080±210	-16170±210	-16080 ± 140	-16160±580
23	-16880 ± 210	-16860 ± 140	-16860 ± 140	-16860 ± 210	-16740 ± 140	-16760 ± 140	-16850 ± 210	-16850±210	-16830 ± 500
				4. J155335.7	8+324308.1				
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2n	d epoch	
Component	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	< Vrad >
1	-2370 ± 140	-2410 ± 140	-2330 ± 140	-2370 ± 140	-2460 ± 140	-2460 ± 140	-2440 ± 140	-2460 ± 140	-2410 ± 400
2	-2780±210	-2820 ± 140	-2780 ± 140	-2840 ± 140	-2770±140	-2770 ± 210	-2720±210	-2750 ± 140	-2780 ± 480
3	-3410 ± 140	-3410 ± 140	-3390 ± 210	-3390 ± 140	-3310 ± 140	-3290 ± 140	-3310 ± 140	-3310±210	-3350 ± 450
4	-4160 ± 140	-4200 ± 140	-4200 ± 210	-4250 ± 140	-4230±140	-4340 ± 140	-4270±140	-4340±210	-4250 ± 450
5	-4940 ± 210	-4980±210	-5000 ± 140	-5040 ± 210	-4900 ± 210	-4880 ± 210	-4970±210	-4990 ± 140	-4960 ± 550
6	-5930 ± 210	-5890 ± 140	-5930 ± 140	-5890 ± 140	-6000 ± 210	-5890 ± 210	-5930 ± 210	-5930 ± 140	-5920 ± 500
7	6210+140	-6230 ± 210	-6300 ± 140	-6320 ± 140	-6290 ± 140	-6220 ± 140	-6310 ± 140	-6220 ± 140	-6260±460
/	-0210 ± 140	0230-210							
8	-7670 ± 70	-7670 ± 140	-7810 ± 140	-7810±210	-7720 ± 140	-7690 ± 140	-7760 ± 140	-7760 ± 140	-7740 ± 410
8	-7670±70 -11410±210	-7670±140 -11470±140	-7810±140 -11390±140	-7810±210 -11410±140	-7720±140 -11400±140	-7690±140 -11490±140	-7760 ± 140 -11450 ± 140	-7760±140 -11470±140	-7740±410 -11440±430

	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2n	d epoch	
Component	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	< Vrad >						
1	-5340 ± 210	-5260 ± 140	-5360±70	-5280±210	-5210±70	-5170 ± 140	-5300±140	-5300±210	-5280 ± 450
2	-5970 ± 140	-5970 ± 210	-5970 ± 140	-5970 ± 140	-5850 ± 140	-5890±210	-5870±210	-5870 ± 140	-5920 ± 480
3	-6300±140	-6360±210	-6300±210	-6360±140	-6330±210	-6330±210	-6330±210	-6330±140	-6330±530
4	-6800±210	-6820±140	-6800 ± 140	-6820±210	-6680±140	-6770±140	-6690±140	-6770 ± 140	-6770±450
5	-7490±210	-7550 ± 140	-7490±70	-7550±210	-7580±70	-7560±70	-7580±140	-7610±140	-7550 ± 400
6	-8250 ± 140	-8270 ± 140	-8210 ± 140	-8270 ± 140	-8110±140	-8220±140	-8110±140	-8200 ± 70	-8210±380
7	-8970±70	-8950±140	-8950±210	-8950±70	-8890±210	-8890±210	-8910±140	-9000±140	-8940±450
8	-9170±140	-9150±210	-9170±70	-9130±140	-9040±70	-9130±140	-9070±210	-9130±210	-9120±450
9	-9490±210	-9510±210	-9490 ± 140	-9510±210	-9440±140	-9400±70	-9420±140	-9420±210	-9460±520
10	-10310 ± 140	-10330 ± 140	-10310±210	-10330±210	-10380±210	-10310 ± 140	-10350±210	-10380 ± 210	-10340 ± 560
11	-10870 ± 70	-10890 ± 70	-10830±210	-10830 ± 140	-10960 ± 140	-10690±210	-10840±210	-10780 ± 210	-10840 ± 540
12	-11290±140	-11270 ± 140	-11190±210	-11270 ± 140	-11330±210	-11380 ± 140	-11310±140	-11310±140	-11290±490
				6. J023252.8	80-001351.1				
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2n	d epoch	
Component	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	< Vrad >						
1	-3960±140	-4040 ± 140	-3940±210	-4020 ± 140	-3980±210	-3990±210	-3980±140	-4010±210	-3990 <u>+</u> 500
2	-4490 ± 140	-4550±210	-4490 ± 140	-4550±140	-4380±140	-4380±140	-4380±210	-4450 ± 140	-4460 <u>+</u> 450
3	-4940 ± 70	-4900 ± 210	-4940 ± 70	-4940 ± 140	-4950 ± 140	-4970±140	-4950±70	-4970±70	-4950 <u>+</u> 350
4	-5420 <u>+</u> 140	-5460 <u>+</u> 140	-5420 <u>+</u> 140	-5490 <u>+</u> 140	-5410 <u>+</u> 140	-5410±210	-5430 <u>+</u> 140	-5470 <u>+</u> 140	-5440 <u>+</u> 430
5	-6860±210	-6920±140	-6860±210	-6920±210	-6860±140	-6900±140	-6860±210	-6900±210	-6890 <u>+</u> 530
6	-7590 <u>+</u> 210	-7630±140	-7630 ± 70	-7690±140	-7430 <u>+</u> 210	-7540 <u>+</u> 140	-7450 <u>+</u> 210	-7540 ± 70	-7560 <u>+</u> 520
7	-8070±140	-8130 <u>+</u> 140	-8030±140	-8090 <u>+</u> 210	-8270±140	-8250 <u>+</u> 140	-8270 <u>+</u> 140	-8200±140	-8160 <u>+</u> 430
8	-8590 <u>+</u> 140	-8570±210	-8650±210	-8630±210	-8510±140	-8580±140	-8560 <u>+</u> 140	-8530±210	-8580 <u>+</u> 500
9	-10010 ± 140	-9930±140	-9830±210	-9830±70	-9980±210	-9980±210	-9980±210	-9910±210	-9930 <u>+</u> 580

				7. J085746.6	01+513444.4				
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2n	d epoch	
Component	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	< Vrad >						
1	-1710±210	-1710±140	-1730±140	-1730±140	-1750±70	-1750±210	-1710±210	-1680±70	-1720±480
2	-2670±140	-2670±210	-2710±70	-2710±210	-2620±140	-2620±140	-2660±210	-2680±140	-2670 <u>+</u> 500
3	-3410±70	-3430±210	-3410±140	-3430±70	-3380±210	-3380±140	-3420±140	-3360±210	-3400 <u>+</u> 480
4	-3780 <u>+</u> 140	-3780±140	-3820 <u>+</u> 210	-3780 <u>+</u> 140	-3790 <u>+</u> 70	-3810 <u>+</u> 210	-3790 <u>+</u> 210	-3790 <u>+</u> 210	-3790 <u>+</u> 520
5	-4140 ± 210	-4180 ± 140	-4160 ± 70	-4160±210	-4230±140	-4180±210	-4140 ± 140	-4160 ± 140	-4170±460
6	-4840 <u>+</u> 70	-4790 <u>+</u> 210	-4810 <u>+</u> 140	-4730 <u>+</u> 210	-4730 <u>+</u> 210	-4820±140	-4750 <u>+</u> 70	-4800 <u>+</u> 210	-4780 <u>+</u> 540
7	-5060 <u>+</u> 140	-5120 <u>+</u> 210	-5040 <u>+</u> 210	-5060 <u>+</u> 140	-5040 <u>+</u> 210	-5080 <u>+</u> 210	-5040 <u>+</u> 140	-5060 <u>+</u> 140	-5060 <u>+</u> 500
8	-5240±210	-5240±140	-5140 <u>+</u> 210	-5220 <u>+</u> 210	-5170 <u>+</u> 140	-5210 <u>+</u> 140	-5230 <u>+</u> 210	-5230 <u>+</u> 210	-5210 <u>+</u> 560
				8. J112742.9	8+022441.8				
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2n	d epoch	
Component	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	< Vrad >						
1	-2330 ± 70	-2330 ± 140	-2300 ± 210	-2300 ± 210	-2250 ± 70	-2310 ± 210	-2250 ± 140	-2310 ± 210	-2300 ± 470
2	-3210 ± 140	-3210 ± 70	-3270 <u>+</u> 70	-3250 ± 140	-3180 ± 140	-3180 ± 70	-3180±210	-3180 ± 210	-3210 ± 440
3	-4980 ± 210	-4980 ± 140	-4960 ± 140	-4940 ± 70	-4990 ± 210	-4990 ± 140	-4990±140	-4990 ± 140	-4980 ± 440
4	-6230±210	-6210 ± 210	-6230 ± 210	-6210±140	-6200±70	-6200 ± 210	-6200±70	-6200 ± 210	-6210 ± 530
5	-7510 ± 140	-7510 ± 70	-7530±210	-7510±210	-7410 ± 140	-7470 ± 210	-7410 ± 140	-7470 ± 140	-7480±530
6	-8910±210	-8870±140	-8910±140	-8850±70	-8930±210	-8930±140	-8930±210	-8930±70	-8910±480
7	-9990±140	-9990±210	-9990±210	-9990±140	-10020 ± 210	-10000 ± 210	-10020±70	-10000 ± 140	-10000 ± 490
8	-10790 ± 210	-10770 ± 210	-10790±210	-10770 ± 210	-10730 ± 140	-10730 ± 210	-10730 ± 140	-10730 ± 210	-10760 ± 640
9	-11650±210	-11650 ± 140	-11650±210	-11650±210	-11670±210	-11670 ± 210	-11650±210	-11670 ± 140	-11660±580
10	-12800 ± 210	-12800 ± 210	-12800 ± 140	-12800 ± 140	-12830 ± 210	-12790 ± 140	-12830±210	-12790 ± 210	-12810 ± 590
11	-14300 ± 140	-14300 ± 210	-14340±210	-14340 ± 70	-14320±210	-14320 ± 210	-14320 ± 140	-14320 ± 70	-14320 ± 510
				9. J113527.2	5+385744.1				

	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2n	ld epoch	
Component	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	< Vrad >						
1	?	?	-5630±70	-5630±140	-5650±70	-5650 ± 140	-5650 ± 140	-5650±70	-4230 ± 270
2	-6090±140	-6150±210	-6110±140	-6090±210	-6130±140	-6130±70	-6130±210	-6130±140	-6120±460
3	-6940±210	-6880±140	-6920±210	-6920±210	-6920±210	-6900±140	-6880±70	-6880±210	-6910±550
4	-7730±210	-7730±70	-7790±210	-7750±140	-7760±210	-7720±210	-7740 ± 140	-7720±210	-7740±610
5	-8610±140	-8610±140	-8590±140	-8570±210	-8620±140	-8650±140	-8620±210	-8650±140	-8620±450
6	-9050±210	-9070±210	-9050±210	-9050±210	-9040±210	-9090±210	-9040±210	-9090±210	-9060±650
7	-9630±210	-9610±140	-9650±210	-9610±210	-9670±210	-9670±210	-9670±140	-9670±210	-9650±640
8	-10650 ± 140	-10690±210	-10650 ± 210	-10650 ± 140	-10600 ± 140	-10580±210	-10600 ± 210	-10580 ± 140	-10630±500
			·	10. J091307.	83+442014.3	·	·	·	
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2n	ld epoch	
Component	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	< Vrad >						
1	-2630±210	-2630 ± 140	-2550 ± 140	-2530 ± 140	-2510 ± 140	-2570 ± 140	-2500 ± 140	-2530 ± 140	-2560 ± 430
2	-3100 ± 140	-3160±210	-3080±210	-3160±140	-3170 ± 140	-3200 ± 140	-3140±210	-3160±210	-3150 ± 540
3	-3450 ± 140	-3430±210	-3430 ± 140	-3430±210	-3440 ± 140	-3460 ± 140	-3440 ± 140	-3440 ± 140	-3440 ± 450
4	-4000±210	-3920±140	-3960 ± 140	-3920±210	-3970±210	-3900±140	-3900±210	-3880±140	-3930±500
5	-4140±210	-4220 ± 140	-4100±210	-4200 ± 140	-4270 ± 140	-4210±210	-4270 ± 140	-4230 ± 140	-4210±480
6	-4810 ± 140	-4750 ± 140	-4730±210	-4650 ± 140	-4730 ± 140	-4710±210	-4730±210	-4710 ± 140	-4730±480
7	-5910±140	-5970 ± 140	-5800 ± 140	-5840 ± 210	-5740 ± 210	-5690 ± 140	-5760 ± 140	-5690 ± 140	-5800 ± 450
8	-7510±140	-7570±140	-7470 ± 140	-7490±140	-7540±210	-7500 ± 140	-7480 ± 140	-7500 ± 140	-7510±430
9	-8170±140	-8230±210	-8190±140	-8230±210	-8160±140	-8110±140	-8140 ± 140	-8110±210	-8170±510
10	-8790±210	-8750 ± 140	-8810±140	-8730±140	-8800±140	-8800±140	-8820±140	-8910±140	-8800 ± 430
11	-9850±140	-9910±140	-9830±140	-9910±210	-9750±210	-9800±210	-9750±210	-9800±140	-9830±500
12	-10430 ± 140	-10490 ± 210	-10430 ± 140	-10490 ± 140	-10420 ± 140	-10490 ± 140	-10420 ± 140	-10490 ± 140	-10460 ± 430
13	-11170±210	-11150 ± 210	-11170±210	-11130±210	-11110±210	-11120±210	-11110 ± 140	-11120 ± 140	-11140±640

14	-11790 ± 210	-11750 ± 140	-11790 ± 140	-11790 ± 140	-11800 ± 140	-11780 ± 140	-11780 ± 140	-11780 ± 210	-11780 ± 450
15	-12380 ± 140	-12420 ± 140	-12380±210	-12420 ± 140	-12520 ± 210	-12520 ± 210	-12540 ± 140	-12520 ± 140	-12460 ± 480
16	-13180 ± 140	-13180 ± 210	-13160 ± 140	-13180 ± 140	-13190 ± 140	-13170 ± 140	-13170 ± 140	-13170 ± 210	-13180 ± 450
17	-13750 ± 140	-13770 ± 210	-13770 ± 140	-13750 ± 140	-13710 ± 140	-13730 ± 140	-13690 ± 140	-13730 ± 140	-13740 ± 430
18	-14320 ± 140	-14260 ± 140	-14170 ± 210	-14170 ± 210	-14090 ± 210	-14090 ± 210	-14070 ± 210	-14090 ± 140	-14160 ± 560
19	-15500 ± 140	-15470 ± 140	-15290±210	-15290 ± 140	-15290 ± 210	-15170 ± 210	-15290 ± 140	-15200 ± 140	-15310 ± 480
20	-16600 ± 140	-16580 ± 210	-16490 ± 140	-16510 ± 140	-16760 ± 210	-16740 ± 140	-16530 ± 210	-16530 ± 140	-16590±480

Πίνακας 6.3. Εύρη (FWHM σε km/s) των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του C IV και του Si IV, και για τις δύο χρονικές περιόδους. Για κάθε BALQSO δίνονται: στην 1^η στήλη ο αύξον αριθμός των συνιστωσών στις οποίες έχουν αναλυθεί οι BALs των Si IV και C IV, στις στήλες 2-5 δίνονται τα FWHM των μπλε και κόκκινων συνιστωσών απορρόφησης του C IV και για τις δύο χρονικές περιόδους, στις στήλες 6-7 δίνονται οι μέσες τιμές των FWHM των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του C IV μεταξύ των δύο εποχών αντίστοιχα, στις στήλες 8-11 δίνονται τα FWHM των μπλε και κόκκινων συνιστωσών απορρόφησης του Si IV και για τις δύο χρονικές περιόδους και στις στήλες 12-13 δίνονται οι μέσες τιμές των FWHM των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του Si IV μεταξύ των δύο εποχών.

					1. J11	4548.38+3937	46.6					
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs	Si IV 1s	t epoch	Si IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs
Component	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>
1	500 ± 50	500 ± 40	550 ± 40	550 ± 60	525±64	525±72	450 ± 40	450 ± 50	480 ± 40	480 ± 50	465±57	465±71
2	730±40	730±50	730±50	730±70	730±64	730±86	430±30	430±40	510 ± 50	510 ± 40	470±58	470±57
3	770±40	770±60	770±60	770±50	770±72	770±78	450±40	450 ± 40	560 ± 60	560 ± 30	505±72	505±50
4	590±40	590 ± 40	590±40	590 ± 40	590±57	590±57	450±50	450 ± 40	510 ± 40	510 ± 50	480±64	480±64
5	820±50	820±30	820±30	820±30	820±58	820±42	530±40	530±40	610±30	610±60	570±50	570±72
6	590±60	590 ± 40	570±40	570±50	580±72	580±64	400±60	400 ± 40	430±40	430±60	415±72	415±72
7	520±30	510 ± 50	610 ± 50	610 ± 60	565±58	560±78	380±760	380 ± 50	450±50	450 ± 40	415±762	415±64
8	450±40	450±40	520±40	520±60	485±57	485±72	400±70	400±60	380±40	380±40	390 <u>±</u> 81	390±72

					2. J10	1056.69+3558	33.3					
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs	Si IV 1s	t epoch	Si IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs
Component	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>
1	500 ± 40	500 ± 40	500 ± 60	500±60	500±72	500±72	380±50	380±50	380±40	380±50	380±64	380±71
2	1600±50	1600 ± 50	1600 ± 40	1600 ± 70	1600±64	1600±86	1010 ± 40	1010 ± 40	1010 ± 50	1010 ± 40	1010±64	1010±57
3	1600 ± 40	1600 ± 60	1600±30	1600 ± 50	1600 ± 50	1600±78	910±40	910±40	960 <u>+</u> 60	1010 ± 40	935±72	960±57
4	1370 ± 50	1370±40	1460 ± 40	1460 ± 40	1415±64	1415±57	860±40	890 <u>±</u> 60	860 <u>+</u> 40	860±40	860±57	875±72
5	1370 ± 40	1370 ± 30	1370 ± 50	1370 ± 30	1370±64	1370±42	1010 ± 50	1010 ± 70	960±30	990±40	985±58	1000±81
6	1370 ± 40	1370±40	1370 ± 40	1370 ± 50	1370±57	1370±64	1010±60	1010±50	940 <u>+</u> 40	940±40	975±72	975±64
7	1370 ± 40	1370 ± 50	1370 ± 50	1370 ± 60	1370±64	1370±78	1010 ± 40	1010 ± 40	1010 ± 50	1010 ± 40	1010±64	1010±57
8	1140 ± 50	1140 ± 40	1140±60	1140 ± 60	1140±78	1140±72	760±30	760±30	760 <u>+</u> 40	760±50	760±50	760±58
9	1370±60	1370±40	1370±60	1370 ± 40	1370±85	1370±57	860±50	860±50	860 <u>+</u> 40	860±60	860±64	860±78
10	1410±30	1410 ± 50	1460 ± 40	1460 ± 50	1435 ± 50	1435±71	900±60	900±60	840±40	860±30	870±72	880±67
11	n/a	n/a	2740±30	2740±60	n/a	n/a	n/a	n/a	1770 ± 40	1770 ± 30	n/a	n/a
12	n/a	n/a	2740 ± 30	2740 ± 30	n/a	n/a	n/a	n/a	1520 ± 40	1520 ± 40	n/a	n/a
					3. J11	4704.46+1532	243.3					
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs	Si IV 1s	t epoch	Si IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs
Component	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>
1	640 ± 40	640 ± 40	640 ± 40	640 ± 40	640 ± 57	640 ± 57	460 ± 40	460 ± 50	450 ± 60	450 ± 50	455±72	455±71
2	680 ± 50	680 ± 50	680±50	680±50	680±71	680±71	510±50	510±40	510±30	510±40	510±58	510±57
3	640 ± 60	640±60	640±60	640±60	640 <u>±</u> 85	640±85	460±60	460±40	450±40	450 ± 40	455±72	455±57
4	910±40	910±40	910±40	910±40	910±57	910±57	710 ± 40	710 ± 50	680 ± 40	680 ± 50	695±57	695±71
5	910±30	910±30	910±30	910±30	910±42	910±42	710±30	710±50	680±50	680±50	695±58	695±71
6	910±40	910±40	910±40	910±40	910±57	910±57	790±40	790±50	780 <u>±</u> 60	780±50	785±72	785±71
7	910±50	910±50	910±50	910±50	910±71	910±71	680±50	680±40	680±40	680±40	680±64	680±57

8	910±40	910±40	910±40	910±40	910±57	910 ± 57	680±40	680±40	710±30	710±40	695±50	695±57
9	820±50	820±40	820±30	820±40	820±58	820±57	380±40	380±40	380±40	380±40	380±57	380±57
10	820±60	820±50	820±40	820±50	820±72	820±71	610±50	610±50	580 ± 50	580 ± 50	595±71	595±71
11	680±40	680±60	680±50	680±60	680±64	680±85	660±60	660±60	660±40	660±60	660±72	660±85
12	960±30	960±40	960±40	960±40	960±50	960±57	710±40	710±30	670±40	670±30	690±57	690±42
13	1030 ± 40	1030 ± 30	1030 ± 40	1030 ± 30	1030±57	1030 ± 42	710±30	710±40	710±30	710±40	710±42	710±57
14	1230±50	1230±40	1230 ± 50	1230 ± 40	1230±71	1230±57	1010 ± 40	1010 ± 40	1010 ± 40	1010 ± 40	1010±57	1010±57
15	1370 ± 40	1370 ± 50	1370±60	1370 ± 50	1370±72	1370±71	1190 ± 50	1190±50	1190 ± 50	1190±50	1190±71	1190±71
16	780±40	780±40	770±40	770±40	775±57	775±57	580 ± 40	580 ± 60	580 ± 40	580 ± 60	580±57	580 <u>±</u> 85
17	820±50	820±40	820±30	820±60	820±58	820±72	610±40	610±40	610±40	610±40	610±57	610±57
18	1140 ± 60	1140 ± 50	1140 ± 40	1140 ± 40	1140±72	1140±64	810±40	810±30	810±50	810±30	810±64	810±42
19	1030 ± 40	1030±60	1030 ± 50	1030 ± 30	1030±64	1030±67	810±40	810±40	810±60	810±50	810±72	810±64
20	1160±30	1160 ± 40	1160±30	1160 ± 40	1160±42	1160 ± 57	630±50	630±50	630±50	630±40	630±71	630±64
21	780±40	780±30	n/a	n/a?	780±40	780±30	560 ± 60	560 ± 40	n/a?	n/a?	560 ± 60	560±40
22	960±50	960±30	1000 ± 50	1000 ± 40	980±71	980±50	840±30	840±30	810±50	810±50	825±58	825±58
23	870±40	870±30	870±30	870±50	870±50	870±58	730±40	730±50	730±50	730±40	730±64	730±64
					4. J15	5335.78+3243	308.1				•	
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs	Si IV 1s	t epoch	Si IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs
Component	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>
1	590±60	590±40	590±40	590±40	590±72	590±57	480±50	480±50	480±50	480±40	480±71	480±64
2	730±40	730±50	760±30	760±50	745±50	745±71	480±40	480±40	430±40	430±50	455±57	455±64
3	740±30	740±60	750±40	750±60	745±50	745±85	580±40	580±40	560±40	560±60	570±57	570±72
4	770±40	770±40	750±50	750±40	760±64	760±57	510±40	510±50	510±40	510±40	510±57	510±64
5	1000±50	1000±30	990±40	990±30	995±64	995±42	710±40	710±60	760±40	760±30	735±57	735±67
6	680±40	680±40	680±40	680±40	680±57	680±57	450±50	450±40	510±50	510±40	480±71	480±57
7	820±40	820±50	870±30	870±50	845±50	845±71	660±60	660±30	660±50	660±50	660±78	660±58
				1			1				1	

8	1230 ± 50	1230 ± 40	1690 ± 50	1690 ± 40	1460 ± 71	1460 ± 57	660±30	660 ± 40	1140 ± 40	1140 ± 40	900 ± 50	900±57
9	570±50	570±40	360 ± 40	360 ± 50	465±64	465±64	530 ± 60	530 ± 30	350±50	350 ± 50	440±78	440±58
					5. J00	3135.57+0034	21.2					
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs
Component	FWHM	FWHM	FWHM	FWHM	<fwhm></fwhm>	<fwhm></fwhm>	FWHM	FWHM	FWHM	FWHM	<fwhm></fwhm>	<fwhm></fwhm>
p	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)
1	750 ± 40	750 ± 40	770 ± 50	750 ± 40	760±64	750±57	560 ± 50	560 ± 40	560 ± 50	560 ± 40	560 ± 71	560±57
2	750±50	750±30	750 ± 40	750±50	750±64	750±58	630±40	630±50	560 ± 40	560 ± 50	595 <u>+</u> 57	595±71
3	550 ± 60	550 ± 40	550 ± 40	550 ± 60	550 ± 72	550 ± 72	330 ± 40	330 ± 60	350 ± 40	350 ± 60	340 ± 57	340 ± 85
4	750 ± 40	750 ± 50	750 ± 30	750 ± 40	750±50	750±64	530 ± 50	530 ± 40	520 ± 30	520 ± 40	525±58	525±57
5	660±30	660 ± 40	660 ± 40	660±30	660±50	660 ± 50	480±60	480±30	450 ± 40	450±30	465±72	465±42
6	640 ± 40	640±40	640±50	640±40	640 <u>±</u> 64	640±57	400±40	400±40	430±50	430±40	415±64	415±57
7	960±50	960±30	960±60	960±50	960±78	960±58	680±30	680±50	680±60	680±50	680±67	680±71
8	590 ± 40	590±40	610 ± 50	610±40	600±64	600±57	450±40	450±40	450±50	450±40	450±64	450±57
9	1000 ± 30	1000 ± 50	1000 ± 40	1000 ± 30	1000 ± 50	1000 ± 58	710±50	710±40	680±40	680±40	695±64	695±57
10	820±40	820±60	820±50	820±40	820±64	820±72	530±30	530 ± 50	630±50	630±50	580±58	580±71
11	590±50	590±50	590±60	590±50	590±78	590±71	450±50	450±50	530±60	530 ± 50	490±78	490±71
12	480±50	480±50	500±40	500 ± 50	490±64	490±71	450±50	450±50	450±40	450±50	450±64	450±71
					6. J02	3252.80-0013	51.1					
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs
Component	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>
1	520 ± 60	520±40	500 ± 60	500 ± 50	510 <u>+</u> 85	510±64	430±50	430±40	430±40	430±40	430±64	430±57
2	570±40	570±30	590±40	590±60	580 <u>+</u> 57	580±67	500 ± 60	500 ± 50	450±40	450±50	475±72	475±71
3	320±30	320±40	340±30	340±40	330±42	330±57	300±40	300±60	270±30	270±60	285±50	285±85
4	450±40	450±50	440±40	440±30	445±57	445±58	430±30	430±40	400±40	400±40	415±50	415±57
5	520±50	520±40	520±50	520±40	520±71	520±57	380±40	380±30	400±50	400±30	390±64	390±42
6	590±40	590±40	610±40	610±40	600±57	600±57	430±50	430±40	480±60	480±40	455±78	455±57

7	480±40	480±30	480±40	480±50	480±57	480±58	350 ± 40	350 ± 50	430±50	430±50	390±64	390±71
8	730±50	730±40	680±50	680±30	705±71	705±50	350 ± 40	350±50	350±40	350±40	350±57	350±64
9	820±30	820±50	730±50	730±40	775±58	775±64	580 ± 50	580±40	400±40	400±60	490±64	490±72
					7. J08	5746.61+5134	144.4					
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs	Si IV 1s	t epoch	Si IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs
Component	FWHM	FWHM	FWHM	FWHM	<fwhm></fwhm>	<fwhm></fwhm>	FWHM	FWHM	FWHM	FWHM	<fwhm></fwhm>	<fwhm></fwhm>
1	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)
1	710 <u>+</u> 40	710 <u>±</u> 40	680 ± 40	680±60	695 <u>+</u> 57	695±72	450 ± 40	450 <u>±</u> 60	580 <u>+</u> 50	580 ± 40	515 <u>±</u> 64	515±72
2	660±50	660±50	680±50	680±30	670±71	670±58	450 ± 50	450±30	430±40	430±50	440±64	440±58
3	840 ± 60	840 ± 60	800 ± 60	800 ± 40	820±85	820±72	460 ± 60	460 ± 40	330 ± 50	330 ± 60	395±78	395±72
4	550 ± 40	550 ± 40	570 ± 40	570 ± 40	560 ± 57	560 ± 57	400±40	400 ± 40	350 ± 60	350 ± 40	375±72	375±57
5	660±30	660±30	660 ± 30	660 ± 50	660±42	660 ± 58	500 ± 30	500 ± 50	420 ± 40	420±30	460 ± 50	460±58
6	640 ± 40	640 ± 40	640 ± 40	640 ± 60	640 ± 57	640±72	480±40	480±60	480±30	480 ± 40	480 ± 50	480±72
7	410±50	410±50	420±50	420±40	415±71	415±64	300 ± 50	300 ± 40	300 ± 40	300 ± 50	300±64	300±64
8	660 ± 40	660±40	590 ± 40	590±30	625±57	625±50	380±40	380±30	400±50	400 ± 40	390±64	390±50
					8. J11	2742.98+0224	41.8					
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs	Si IV 1s	t epoch	Si IV 2n	d epoch	Mean betw	een epochs
Component	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm></fwhm>	<fwhm></fwhm>	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (rod)	<fwhm></fwhm>	<fwhm></fwhm>
1	1030+40	1030+40	1030+40	1030+40	1030+57	1030+57	1010+40	1010+40	1010+30	1010+50	1010+50	1010+64
2.	1370+50	1370+50	1370+50	1370+50	1370+71	1370+71	1010+50	1010+50	1010+40	1010+40	1010+64	1010+64
3	1370+60	1370+60	1440+40	1440+60	1405+72	1405+85	1010+60	1010+60	1010+50	1010+50	1010+78	1010+78
4	1370+40	1370+40	1370+60	1370+40	1370+72	1370+57	1010+40	1010+40	1010+40	1010+60	1010+57	1010+72
5	1370+30	1370+30	1370+70	1370+30	1370+76	1370+42	810+30	810+30	810+40	810+40	810+50	810+50
6	1370±40	1370±40	1370±50	1370±40	1370±64	1370±57	1010±40	1010±40	1010±50	1010±30	1010±64	1010±50
7	1190±50	1190±50	1190±40	1190±50	 1190±64	 1190±71	960±50	960±50	960±60	960±40	 960±78	960±64
8	1280±40	1280±40	1280 ± 50	1280±40	1280±64	1280±57	1060±40	1060±40	1060 ± 40	1060 ± 50	1060 ± 57	1060±64
9	1300±60	1300±50	1300±60	1300±30	1300±85	1300±58	1010±30	1010±40	1010±50	1010±60	1010±58	1010±72

10	1370 ± 70	1370 ± 60	1370 ± 40	1370 ± 60	1370 ± 81	1370±85	1010 ± 50	1010 ± 50	1110 ± 60	1110 ± 40	1060 ± 78	1060 ± 64	
11	1370 ± 50	1370 ± 50	1370±30	1370 ± 40	1370 ± 58	1370±64	1010 ± 50	1010±60	1270 ± 40	1270±30	1140±64	1140±67	
			•	•	9. J11	3527.25+3857	744.1	•					
	C IV 1s	t epoch	C IV 2n	C IV 2nd epoch N		Mean between epochs		Si IV 1st epoch		Si IV 2nd epoch		Mean between epochs	
Component	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>	
1	?	?	1510 ± 40	1510 ± 70	1510 ± 40	1510 ± 70	910±40	910 ± 50	910±70	910 ± 40	910 <u>+</u> 81	910±64	
2	1280 ± 40	1280 ± 40	1370 ± 50	1370 ± 50	1325±64	1325±64	1010 ± 50	1010 ± 60	1010 ± 50	1010 ± 50	1010±71	1010±78	
3	1030 ± 30	1030 ± 50	1030 ± 60	1030 ± 40	1030 ± 67	1030 ± 64	890±60	890±40	860±40	860±60	875±72	875±72	
4	1230 ± 40	1230±60	1230±40	1230 ± 50	1230 ± 57	1230±78	910±40	910±30	910±50	910±40	910±64	910±50	
5	1090 ± 50	1090 ± 40	1100±30	1100 ± 60	1095 ± 58	1095±72	890±30	890±40	860±60	860±30	875±67	875±50	
6	1370 ± 40	1370 ± 30	1370±40	1370 ± 40	1370 ± 57	1370 ± 50	1110±40	1110±50	1120±40	1120±40	1115±57	1115±64	
7	890±50	890±40	890±50	890±30	890±71	890±50	860±50	860±40	860±30	860±50	860±58	860±64	
8	960±60	960±50	980±40	980±40	970±72	970±64	710±40	710±60	710±40	710±40	710±57	710±72	
	10. J091307.83+442014.3												
	C IV 1st epoch				Mean betw	een epochs	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2n	d epoch	Mean between epochs		
Component	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>	FWHM (blue)	FWHM (red)	FWHM (blue)	FWHM (red)	<fwhm> (blue)</fwhm>	<fwhm> (red)</fwhm>	
1	420±40	420±40	420±40	410±30	420 <u>+</u> 57	415±50	340 ± 40	330±40	350±40	350±40	345±57	340 <u>+</u> 57	
2	710±50	710±50	710±50	710±40	710±71	710±64	410±50	410±50	410±50	400±50	410±71	405±71	
3	660±60	640±60	640±60	640±50	650±85	640±78	400±60	390±60	380±60	380±60	390±85	385±85	
4	550 ± 40	570 ± 40	550 ± 40	570 ± 40	550±57	570 ± 57	390±40	400±40	390±40	390±40	390±57	395±57	
5	500 ± 30	500±30	500±30	500±30	500±42	500±42	300±30	300±30	280±30	280±30	290±42	290±42	
6	390±40	390±40	340±40	340±50	365±57	365 ± 64	430±40	430±40	380±40	380±40	405±57	405±57	
7	390±50	390±50	360±50	360±40	375±71	375±64	290±50	290±50	280±50	280±50	285±71	285±71	
8	360±30	360±40	340±40	340±50	350 ± 50	350 ± 64	390±40	390±40	330±40	320±40	360±57	355±57	
9	410±40	410±30	410±50	410±40	410±64	410±50	430±30	430±30	430±50	430±30	430±58	430±42	
10	750 ± 50	760±50	780±40	780±50	765±64	770±71	840±40	840±40	840±60	840±50	840±72	840±64	

11	710 ± 40	710 ± 40	700 ± 50	680 ± 40	705±64	695±57	730 ± 40	730 ± 50	730±40	730 ± 40	730±57	730±64
12	730±50	730±50	730±60	730±40	730±78	730±64	710±50	710±60	710±30	710±50	710±58	710±78
13	750 ± 50	750±40	750 ± 40	750±50	750±64	750±64	720±60	720±40	720±40	720±40	720±72	720±57
14	750 ± 40	750 ± 50	780±30	780±60	765±50	765±78	790±40	790±30	770±50	770±50	780±64	780±58
15	750 ± 50	750 ± 60	750 ± 40	750 ± 40	750±64	750±72	730±30	730±40	760 ± 40	730±60	745±50	730±72
16	750 ± 60	750 ± 40	710 ± 50	710±30	730±78	730±50	810±40	810±50	810±50	810±40	810±64	810±64
17	730±40	730±30	730±30	730±40	730 ± 50	730±50	610 ± 50	610±40	610 ± 40	610±30	610±64	610 ± 50
18	820±30	820±40	780 ± 40	750 ± 50	800 ± 50	785±64	610±40	610±30	610±30	610 ± 40	610 ± 50	610 ± 50
19	480±40	480±50	460±50	460±40	470±64	470±64	480±50	480±40	430±40	430±50	455±64	455±64
20	410±50	410±40	340±40	340±60	375±64	375±72	430±60	430±50	350 ± 50	350±40	390±78	390±64

Πίνακας 6.4. Οπτικά βάθη στο κέντρο της γραμμής απορρόφησης (τ₀), για τις μπλε και κόκκινες συνιστώσες του C IV και του Si IV και για τις δύο περιόδους. Για κάθε BALQSO δίνονται: στην 1^η στήλη ο αύξον αριθμός των συνιστωσών στις οποίες έχουν αναλυθεί οι BALs των Si IV και C IV. Στις στήλες 2-5 δίνονται τα οπτικά βάθη των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του C IV και για τις δύο περιόδους, στις στήλες 6-9 δίνονται τα οπτικά βάθη των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του C IV και για τις δύο περιόδους.

1. J114548.38+393746.6											
	C IV 1st Epoch		C IV 2nd Epoch		Si IV 1s	t Epoch	Si IV 2nd Epoch				
Component	τ ₀ (blue)	$\tau_0(red)$	τ ₀ (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)			
1	0.64± 0.06	0.34± 0.06	0.76 ± 0.04	0.39± 0.02	0.10 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.26 ± 0.03	0.15 ± 0.04			
2	1.04 ± 0.08	1.00 ± 0.08	0.95±0.05	0.95±0.04	1.12 ± 0.01	1.11 ± 0.04	1.33 ± 0.03	1.33 ± 0.05			
3	0.25 ± 0.04	0.20 ± 0.04	0.27 ± 0.06	0.20 ± 0.05	1.70 ± 0.02	1.17 ± 0.05	2.20 ± 0.02	1.99± 0.05			
4	0.42 ± 0.04	0.33 ± 0.04	0.40 ± 0.07	0.29± 0.05	0.64 ± 0.09	0.52 ± 0.05	0.97±0.09	0.76± 0.07			
5	0.54 ± 0.05	0.42 ± 0.05	0.56± 0.05	0.39± 0.07	0.52 ± 0.07	0.36 ± 0.07	0.51 ± 0.07	0.36± 0.06			
6	0.36± 0.06	0.26 ± 0.06	0.48 ± 0.05	0.28± 0.06	0.15 ± 0.08	0.15 ± 0.06	0.23 ± 0.08	0.18 ± 0.07			
7	0.56± 0.07	0.56 ± 0.07	0.65 ± 0.04	0.46 ± 0.07	0.13 ± 0.02	0.08 ± 0.05	0.16± 0.02	0.09± 0.06			

8	0.24± 0.05	0.19± 0.05	0.44 ± 0.04	0.31± 0.06	0.10 ± 0.02	0.08± 0.06	0.09± 0.02	0.08 ± 0.05			
2. J101056.69+355833.3											
	C IV 1st Epoch		C IV 2nd	d Epoch	Si IV 1s	t Epoch	Si IV 2nd Epoch				
Component	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue) τ_0 (red)		τ_0 (blue) τ_0 (red)		τ_0 (blue)	τ_0 (red)			
1	0.38±0.05	0.38± 0.05	0.33±0.05	0.33±0.05	0.12 ± 0.04	0.12 ± 0.05	0.08 ± 0.04	0.07 ± 0.04			
2	0.45 ± 0.04	0.45 ± 0.04	0.39± 0.06	0.38± 0.07	1.17 ± 0.04	1.17 ± 0.07	0.85 ± 0.04	0.81 ± 0.08			
3	0.26 ± 0.04	0.26 ± 0.04	0.25 ± 0.05	0.24 ± 0.08	1.50 ± 0.02	1.50 ± 0.08	1.12 ± 0.02	1.10 ± 0.08			
4	0.53±0.05	0.27±0.05	0.56± 0.03	0.28± 0.08	0.33 ± 0.01	0.17 ± 0.08	0.43 ± 0.01	0.20 ± 0.08			
5	0.56 ± 0.06	0.28 ± 0.06	0.56 ± 0.04	0.28 ± 0.08	0.30 ± 0.06	0.15 ± 0.08	0.40 ± 0.06	0.20 ± 0.07			
6	0.67 ± 0.05	0.38± 0.05	0.57 ± 0.04	0.52 ± 0.07	0.34 ± 0.07	0.19 ± 0.07	0.35 ± 0.07	0.35 ± 0.05			
7	0.33±0.03	0.32±0.03	0.38± 0.05	0.34± 0.05	0.26 ± 0.06	0.26 ± 0.05	0.35±0.05	0.35 ± 0.04			
8	0.15 ± 0.04	0.15 ± 0.04	0.13±0.06	0.11 ± 0.04	0.37 ± 0.04	0.37 ± 0.04	0.47 ± 0.05	0.37 ± 0.04			
9	0.17 ± 0.04	0.17 ± 0.04	0.17 ± 0.05	0.16± 0.06	0.38 ± 0.07	0.38±0.06	0.54 ± 0.07	0.49± 0.05			
10	0.36± 0.05	0.35 ± 0.05	0.42 ± 0.04	0.34± 0.08	0.17 ± 0.08	0.16 ± 0.08	0.43±0.08	0.35 ± 0.05			
11	n/a	n/a	0.24 ± 0.02	0.12±0.03	n/a	n/a	0.12 ± 0.03	0.06 ± 0.02			
12	n/a	n/a	0.10 ± 0.03	0.10 ± 0.02	n/a	n/a	0.09± 0.02	0.09± 0.02			
			3. J1 1	14704.46+153	243.3						
	C IV 1s	t Epoch	C IV 2nd	d Epoch	Si IV 1s	t Epoch	Si IV 2nd Epoch				
Component	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)			
1	0.05 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.06 ± 0.04	0.06 ± 0.03	0.06 ± 0.03	0.03 ± 0.01			
2	0.05 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.08 ± 0.04	0.08 ± 0.03	0.07 ± 0.03	0.07 ± 0.03			
3	0.17 ± 0.08	0.10 ± 0.04	0.16 ± 0.07	0.10 ± 0.02	0.11 ± 0.05	0.11 ± 0.02	0.11 ± 0.06	0.11 ± 0.04			
4	0.56 ± 0.08	0.46 ± 0.05	0.55 ± 0.05	0.50 ± 0.09	0.33 ± 0.03	0.33 ± 0.09	0.36 ± 0.05	0.36 ± 0.05			
5	0.31 ± 0.08	0.31 ± 0.05	0.28 ± 0.05	0.27 ± 0.07	0.51 ± 0.04	0.51 ± 0.07	0.58 ± 0.03	0.58 ± 0.05			
6	0.67 ± 0.07	0.37 ± 0.07	0.62 ± 0.04	0.41 ± 0.08	0.23 ± 0.04	0.20 ± 0.08	0.41 ± 0.04	0.20 ± 0.07			
7	0.31 ± 0.05	0.24 ± 0.06	0.26 ± 0.04	0.15 ± 0.02	0.33 ± 0.05	0.17 ± 0.02	0.28 ± 0.04	0.14 ± 0.06			

8	0.37 ± 0.04	0.34 ± 0.07	0.42 ± 0.05	0.42 ± 0.02	1.00 ± 0.06	0.49 ± 0.02	0.84 ± 0.05	0.42 ± 0.07
9	0.44 ± 0.06	0.22 ± 0.06	0.46 ± 0.06	0.23 ± 0.04	0.22 ± 0.05	0.11 ± 0.04	0.34 ± 0.06	0.17 ± 0.06
10	0.25 ± 0.08	0.21 ± 0.05	0.26 ± 0.05	0.18 ± 0.04	0.28 ± 0.04	0.14 ± 0.04	0.16 ± 0.07	0.11 ± 0.05
11	0.37 ± 0.07	0.24 ± 0.07	0.14 ± 0.03	0.11 ± 0.02	0.33 ± 0.04	0.16 ± 0.02	0.16 ± 0.05	0.16 ± 0.07
12	0.49 ± 0.04	0.41 ± 0.08	0.52 ± 0.04	0.31 ± 0.01	0.42 ± 0.05	0.26 ± 0.01	0.24 ± 0.05	0.12 ± 0.08
13	0.32 ± 0.07	0.19 ± 0.08	0.20 ± 0.04	0.20 ± 0.06	0.22 ± 0.06	0.21 ± 0.06	0.22 ± 0.04	0.19 ± 0.08
14	0.43 ± 0.08	0.36 ± 0.08	0.38 ± 0.06	0.33 ± 0.07	0.34 ± 0.07	0.29 ± 0.07	0.22 ± 0.04	0.15 ± 0.07
15	0.69 <u>+</u> 0.07	0.47 ± 0.07	0.70 ± 0.05	0.51 ± 0.06	0.73 ± 0.05	0.57 ± 0.06	0.49 ± 0.05	0.33 ± 0.07
16	0.28 ± 0.06	0.27 ± 0.05	0.24 ± 0.07	0.14 ± 0.05	0.47 ± 0.05	0.30 ± 0.05	0.36 ± 0.06	0.25 ± 0.05
17	0.22 ± 0.04	0.19 ± 0.04	0.20 ± 0.08	0.20 ± 0.07	0.27 ± 0.04	0.20 ± 0.07	0.17 ± 0.05	0.14 ± 0.04
18	0.24 ± 0.07	0.22 ± 0.06	0.22 ± 0.08	0.21 ± 0.08	0.23 ± 0.04	0.18 ± 0.08	0.17 ± 0.03	0.15 ± 0.06
19	0.55 ± 0.03	0.35 ± 0.08	0.55 ± 0.08	0.27 ± 0.08	0.19 ± 0.05	0.15 ± 0.08	0.26 ± 0.07	0.15 ± 0.08
20	0.29 <u>+</u> 0.01	0.28 ± 0.07	0.14 ± 0.05	0.08 ± 0.08	0.08 ± 0.06	0.08 ± 0.05	0.07 ± 0.04	0.07 ± 0.07
21	0.19 ± 0.02	0.19 ± 0.04	n/a	n/a	0.09 ± 0.03	0.04 ± 0.02	n/a	n/a
22	0.08 ± 0.04	0.06 ± 0.03	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.11 ± 0.03	0.11 ± 0.06	0.11 ± 0.05	0.05 ± 0.03
23	0.08 ± 0.04	0.05 ± 0.02	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.19 ± 0.07	0.11 ± 0.05	0.20 ± 0.01	0.11 ± 0.02
			4. J15	55335.78+324	308.1			
	C IV 1s	t Epoch	C IV 2nd	d Epoch	Si IV 1s	t Epoch	Si IV 2nd Epoch	
Component	τ ₀ (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)
1	1.19 ± 0.04	1.18 ± 0.09	1.38 ± 0.06	1.38 ± 0.07	0.13 ± 0.05	0.12 ± 0.03	0.17 ± 0.05	0.16 ± 0.09
2	0.30 ± 0.06	0.25 ± 0.07	0.49 ± 0.04	0.25 ± 0.06	0.36 ± 0.05	0.27 ± 0.04	0.66 ± 0.03	0.57 ± 0.07
3	0.92 ± 0.08	0.89 <u>+</u> 0.08	1.13 ± 0.04	0.80 ± 0.07	0.16 ± 0.04	0.16 ± 0.04	0.27 ± 0.04	0.2 ± 0.08
4	0.57 ± 0.07	0.34 ± 0.02	0.70 ± 0.05	0.50 ± 0.06	0.13 ± 0.04	0.05 ± 0.03	0.17 ± 0.04	0.1 ± 0.05
5	0.65 ± 0.09	0.38 ± 0.02	0.83 ± 0.06	0.56 ± 0.05	0.06 ± 0.03	0.04 ± 0.02	0.17 ± 0.05	0.12 ± 0.06
6	0.32 ± 0.07	0.31 ± 0.04	0.45 ± 0.05	0.42 ± 0.04	0.07 ± 0.03	0.07 ± 0.03	0.21 ± 0.06	0.21 ± 0.05
7	0.11 ± 0.05	0.09 ± 0.04	0.38 ± 0.03	0.30 ± 0.08	0.05 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.23 ± 0.05	0.21 ± 0.07

8	0.06 ± 0.04	0.04 ± 0.02	0.26 ± 0.04	0.14 ± 0.08	0.07 ± 0.03	0.04 ± 0.03	0.09 ± 0.04	0.05 ± 0.03			
9	0.26 ± 0.06	0.16 ± 0.06	0.52 ± 0.05	0.35 ± 0.07	0.13 ± 0.04	0.07 ± 0.04	0.15 ± 0.05	0.15 ± 0.08			
5. J003135.57+003421.2											
	C IV 1s	t Epoch	C IV 2nd	d Epoch	Si IV 1s	t Epoch	Si IV 2nd Epoch				
Component	τ ₀ (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)			
1	0.98 ± 0.07	0.98 ± 0.07	1.09 ± 0.06	1.04 ± 0.05	0.08 ± 0.05	0.08 ± 0.04	0.12 ± 0.06	0.1 ± 0.05			
2	0.48 ± 0.05	0.41 ± 0.06	0.50 ± 0.05	0.44 ± 0.04	0.55 ± 0.06	0.48 ± 0.05	0.61 ± 0.07	0.56 ± 0.05			
3	0.31 ± 0.05	0.26 ± 0.05	0.30 ± 0.04	0.24 ± 0.06	0.08 ± 0.03	0.08 ± 0.05	0.12 ± 0.05	0.12 ± 0.04			
4	0.67 ± 0.04	0.66 ± 0.07	0.71 ± 0.04	0.71 ± 0.05	0.46 ± 0.04	0.45 ± 0.04	0.56 ± 0.05	0.56 ± 0.06			
5	0.69 ± 0.04	0.61 ± 0.08	0.72 ± 0.05	0.63 ± 0.05	0.18 ± 0.04	0.18 ± 0.04	0.26 ± 0.04	0.2 ± 0.08			
6	0.46 ± 0.05	0.34 ± 0.08	0.50 ± 0.06	0.43 ± 0.03	0.07 ± 0.02	0.05 ± 0.03	0.12 ± 0.04	0.11 ± 0.07			
7	0.46 ± 0.06	0.40 ± 0.08	0.53 ± 0.07	0.35 ± 0.01	0.25 ± 0.02	0.22 ± 0.06	0.47 ± 0.05	0.3 ± 0.09			
8	0.16 ± 0.05	0.11 ± 0.07	0.14 ± 0.05	0.12 ± 0.03	0.33 ± 0.07	0.21 ± 0.05	0.29 ± 0.06	0.26 ± 0.07			
9	0.40 ± 0.03	0.29 ± 0.05	0.50 ± 0.05	0.30 ± 0.04	0.26 ± 0.05	0.19 ± 0.03	0.40 ± 0.05	0.25 ± 0.08			
10	0.39 ± 0.04	0.29 ± 0.04	0.64 ± 0.04	0.43 ± 0.05	0.13 ± 0.05	0.09 ± 0.06	0.13 ± 0.03	0.09 ± 0.07			
11	0.37 ± 0.04	0.26 ± 0.06	0.24 ± 0.04	0.15 ± 0.05	0.05 ± 0.03	0.05 ± 0.03	0.10 ± 0.05	0.08 ± 0.06			
12	0.15 ± 0.05	0.11 ± 0.08	0.32 ± 0.05	0.32 ± 0.07	0.12 ± 0.04	0.05 ± 0.02	0.05 ± 0.03	0.05 ± 0.05			
			6. JO	23252.80-0013	351.1						
	C IV 1s	t Epoch	C IV 2nd	d Epoch	Si IV 1s	t Epoch	Si IV 2nd Epoch				
Component	τ ₀ (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)			
1	0.57 ± 0.03	0.57 ± 0.07	0.75 ± 0.06	0.75 ± 0.06	0.08 ± 0.05	0.08 ± 0.04	0.23 ± 0.06	0.15 ± 0.07			
2	0.79 ± 0.05	0.45 ± 0.04	0.94 ± 0.05	0.49 ± 0.07	0.23 ± 0.06	0.13 ± 0.08	0.35 ± 0.05	0.25 ± 0.03			
3	0.15 ± 0.05	0.15 ± 0.05	0.28 ± 0.03	0.20 ± 0.06	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.06 ± 0.02	0.05 ± 0.02			
4	1.20 ± 0.08	0.70 ± 0.08	1.50 ± 0.04	0.82 ± 0.05	0.18 ± 0.03	0.13 ± 0.05	0.24 ± 0.04	0.17 ± 0.08			
5	0.29 ± 0.08	0.24 ± 0.07	0.34 ± 0.04	0.34 ± 0.07	0.10 ± 0.04	0.08 ± 0.04	0.12 ± 0.04	0.06 ± 0.03			
6	0.20 ± 0.08	0.19 ± 0.06	0.42 ± 0.06	0.31 ± 0.08	0.08 ± 0.04	0.08 ± 0.04	0.08 ± 0.03	0.08 ± 0.04			
7	0.07 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.13 ± 0.05	0.10 ± 0.01	0.06 ± 0.03	0.05 ± 0.02	0.18 ± 0.04	0.18 ± 0.04			
-----------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------			
8	0.61 ± 0.05	0.42 ± 0.07	0.82 ± 0.07	0.55 ± 0.06	0.15 ± 0.05	0.11 ± 0.06	0.22 ± 0.03	0.15 ± 0.06			
9	0.19 ± 0.04	0.19 ± 0.03	0.27 ± 0.08	0.26 ± 0.07	0.10 ± 0.05	0.05 ± 0.05	0.14 ± 0.04	0.08 ± 0.04			
			7. J08	35746.61+513	444.4						
	C IV 1s	t Epoch	C IV 2nd	d Epoch	Si IV 1s	t Epoch	Si IV 2nd Epoch				
Component	τ_0 (blue)	τ_0 (red)									
1	0.11 ± 0.07	0.06 ± 0.04	0.33 ± 0.07	0.28 ± 0.07	0.10 ± 0.07	0.05 ± 0.03	0.17 ± 0.04	0.15 ± 0.04			
2	0.15 ± 0.04	0.08 ± 0.04	0.25 ± 0.08	0.25 ± 0.08	0.13 ± 0.08	0.07 ± 0.03	0.09 ± 0.04	0.09 ± 0.04			
3	0.50 ± 0.07	0.28 ± 0.04	0.50 ± 0.08	0.33 ± 0.08	0.45 ± 0.08	0.25 ± 0.06	0.46 ± 0.05	0.37 ± 0.05			
4	0.23 ± 0.08	0.14 ± 0.06	0.25 ± 0.04	0.13 ± 0.08	0.26 ± 0.08	0.16 ± 0.04	0.1 ± 0.05	0.06 ± 0.03			
5	0.95 ± 0.07	0.51 ± 0.08	0.74 ± 0.04	0.55 ± 0.07	1.11 ± 0.07	0.6 ± 0.07	1.20 ± 0.04	0.98 ± 0.07			
6	0.48 ± 0.06	0.26 ± 0.07	0.37 ± 0.05	0.36 ± 0.05	1.24 ± 0.05	0.67 ± 0.03	1.10 ± 0.04	0.88 ± 0.05			
7	0.82 ± 0.04	0.56 ± 0.09	1.06 ± 0.06	0.53 ± 0.04	0.25 ± 0.04	0.15 ± 0.01	0.09 ± 0.03	0.05 ± 0.02			
8	0.23 ± 0.07	0.21 ± 0.07	0.30 ± 0.05	0.19 ± 0.07	0.12 ± 0.07	0.09 ± 0.02	0.12 ± 0.06	0.11 ± 0.04			
			8. J11	12742.98+022	441.8						
	C IV 1st	t Epoch	C IV 2nd	d Epoch	Si IV 1s	t Epoch	Si IV 2n	d Epoch			
Component	τ_0 (blue)	τ_0 (red)									
1	0.06 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.12 ± 0.03	0.07 ± 0.04	0.15 ± 0.03	0.08 ± 0.05			
2	0.07 ± 0.04	0.06 ± 0.04	0.14 ± 0.04	0.07 ± 0.05	0.07 ± 0.05	0.07 ± 0.04	0.13 ± 0.06	0.07 ± 0.03			
3	0.10 ± 0.05	0.07 ± 0.03	0.19 ± 0.05	0.17 ± 0.05	0.06 ± 0.03	0.05 ± 0.02	0.10 ± 0.03	0.06 ± 0.02			
4	0.10 ± 0.05	0.08 ± 0.04	0.11 ± 0.06	0.09 ± 0.04	0.10 ± 0.04	0.03 ± 0.01	0.17 ± 0.02	0.16 ± 0.03			
5	0.45 ± 0.06	0.23 ± 0.03	0.42 ± 0.05	0.21 ± 0.08	0.16 ± 0.08	0.07 ± 0.05	0.16 ± 0.04	0.07 ± 0.02			
6	0.37 ± 0.08	0.36 ± 0.08	0.29 ± 0.04	0.29 ± 0.08	0.15 ± 0.08	0.15 ± 0.05	0.15 ± 0.08	0.15 ± 0.02			
7	0.25 ± 0.08	0.15 ± 0.08	0.25 ± 0.04	0.16 ± 0.08	0.36 ± 0.08	0.19 ± 0.04	0.18 ± 0.02	0.17 ± 0.04			
8	0.24 ± 0.05	0.17 ± 0.05	0.24 ± 0.05	0.17 ± 0.07	0.38 ± 0.07	0.29 ± 0.04	0.26 ± 0.05	0.23 ± 0.05			
9	0.33 ± 0.05	0.26 ± 0.05	0.34 ± 0.06	0.3 ± 0.05	0.48 ± 0.05	0.34 ± 0.05	0.50 ± 0.04	0.25 ± 0.05			

10	0.50 ± 0.04	0.29 ± 0.04	0.33 ± 0.07	0.28 ± 0.04	0.27 ± 0.04	0.14 ± 0.06	0.25 ± 0.04	0.15 ± 0.07
11	0.36 ± 0.06	0.26 ± 0.06	0.28 ± 0.05	0.14 ± 0.06	0.10 ± 0.06	0.10 ± 0.05	0.20 ± 0.03	0.20 ± 0.01
			9. J11	13527.25+385	744.1			
	C IV 1st Epoch			C IV 2nd Epoch		Si IV 1st Epoch		d Epoch
Component	τ_0 (blue)	τ_0 (red)						
1	0.08 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.35 ± 0.05	0.35 ± 0.04	0.03 ± 0.02	0.02 ± 0.02	0.21 ± 0.06	0.10 ± 0.07
2	0.46 ± 0.06	0.23 ± 0.06	0.53 ± 0.04	0.41 ± 0.04	0.23 ± 0.04	0.13 ± 0.06	0.77 ± 0.02	0.77 ± 0.06
3	0.58 ± 0.05	0.39 ± 0.05	0.39 ± 0.04	0.22 ± 0.05	0.62 ± 0.05	0.62 ± 0.05	0.56 ± 0.02	0.57 ± 0.05
4	0.49 ± 0.08	0.48 ± 0.08	0.73 ± 0.05	0.58 ± 0.06	0.45 ± 0.06	0.38 ± 0.07	0.32 ± 0.01	0.16 ± 0.07
5	0.76 ± 0.08	0.39 ± 0.08	0.10 ± 0.06	0.09 ± 0.05	0.35 ± 0.05	0.25 ± 0.08	0.26 ± 0.05	0.12 ± 0.08
6	0.08 ± 0.05	0.08 ± 0.04	0.13 ± 0.05	0.10 ± 0.04	0.09 ± 0.04	0.08 ± 0.05	0.18 ± 0.05	0.12 ± 0.08
7	0.19 ± 0.07	0.15 ± 0.07	0.40 ± 0.03	0.40 ± 0.04	0.13 ± 0.04	0.11 ± 0.04	0.26 ± 0.04	0.25 ± 0.08
8	0.40 ± 0.06	0.39 ± 0.05	0.23 ± 0.04	0.16 ± 0.05	0.14 ± 0.05	0.09 ± 0.03	0.08 ± 0.04	0.04 ± 0.08
			10. JO	91307.83+442	014.3			
	C IV 1st	t Epoch	C IV 2nd	d Epoch	Si IV 1s	t Epoch	Si IV 2n	d Epoch
Component	τ_0 (blue)	τ_0 (red)						
1	0.59 ± 0.08	0.59 ± 0.04	0.78 ± 0.04	0.77 ± 0.06	0.43 ± 0.06	0.36 ± 0.05	0.51 ± 0.05	0.39 ± 0.05
2	0.72 ± 0.07	0.45 ± 0.06	0.78 ± 0.06	0.49 ± 0.07	1.16 ± 0.07	1.15 ± 0.04	1.89 ± 0.06	1.90 ± 0.05
3	0.56 ± 0.09	0.55 ± 0.08	0.56 ± 0.05	0.56 ± 0.05	2.21 ± 0.05	2.25 ± 0.06	2.48 ± 0.05	2.5 ± 0.04
4	0.79 ± 0.07	0.43 ± 0.07	0.75 ± 0.07	0.40 ± 0.05	2.19 ± 0.05	2.14 ± 0.06	2.33 ± 0.02	2.33 ± 0.06
5	0.77 ± 0.08	0.61 ± 0.04	0.60 ± 0.08	0.59 ± 0.04	0.33 ± 0.04	0.16 ± 0.05	0.35 ± 0.06	0.21 ± 0.08
6	0.31 ± 0.07	0.28 ± 0.07	0.35 ± 0.04	0.27 ± 0.04	0.14 ± 0.04	0.12 ± 0.04	0.09 ± 0.04	0.05 ± 0.02
7	0.16 ± 0.06	0.16 ± 0.08	0.14 ± 0.05	0.12 ± 0.05	0.25 ± 0.05	0.13 ± 0.04	0.16 ± 0.07	0.06 ± 0.05
8	0.79 ± 0.05	0.80 ± 0.07	0.91 ± 0.06	0.89 ± 0.06	0.34 ± 0.06	0.35 ± 0.05	0.36 ± 0.08	0.34 ± 0.04
1				_				
9	0.20 ± 0.07	0.18 ± 0.06	0.24 ± 0.07	0.16 ± 0.05	0.13 ± 0.04	0.14 ± 0.03	0.10 ± 0.05	0.08 ± 0.04

11	0.51 ± 0.02	0.40 ± 0.07	0.53 ± 0.05	0.52 ± 0.04	0.4 ± 0.07	0.25 ± 0.06	0.36 ± 0.03	0.18 ± 0.03
12	0.55 ± 0.08	0.29 ± 0.03	0.57 ± 0.04	0.32 ± 0.04	0.52 ± 0.06	0.52 ± 0.05	0.51 ± 0.05	0.5 ± 0.08
13	0.63 ± 0.05	0.46 ± 0.02	0.64 ± 0.04	0.45 ± 0.08	0.84 ± 0.08	0.81 ± 0.04	0.82 ± 0.05	0.82 ± 0.06
14	0.45 ± 0.05	0.35 ± 0.08	0.46 ± 0.05	0.40 ± 0.07	0.47 ± 0.06	0.47 ± 0.04	0.48 ± 0.06	0.48 ± 0.05
15	0.63 ± 0.04	0.49 ± 0.05	0.62 ± 0.06	0.42 ± 0.06	0.53 ± 0.05	0.30 ± 0.06	0.64 ± 0.05	0.36 ± 0.04
16	0.49 ± 0.08	0.33 ± 0.05	0.52 ± 0.05	0.41 ± 0.04	0.24 ± 0.05	0.22 ± 0.05	0.29 ± 0.03	0.21 ± 0.04
17	0.18 ± 0.06	0.14 ± 0.04	0.26 ± 0.03	0.20 ± 0.07	0.34 ± 0.05	0.31 ± 0.03	0.38 ± 0.04	0.29 ± 0.06
18	0.59 ± 0.06	0.31 ± 0.06	0.59 ± 0.04	0.30 ± 0.07	0.27 ± 0.04	0.2 ± 0.04	0.16 ± 0.04	0.15 ± 0.05
19	0.17 ± 0.04	0.16 ± 0.08	0.07 ± 0.04	0.07 ± 0.04	0.21 ± 0.04	0.12 ± 0.04	0.08 ± 0.08	0.09 ± 0.04
20	0.20 ± 0.05	0.20 ± 0.07	0.10 ± 0.08	0.08 ± 0.04	0.20 ± 0.05	0.20 ± 0.08	0.06 ± 0.03	0.03 ± 0.01

Πίνακας 6.5. Ισοδύναμα εύρη (EW σε Å), για τις μπλε και κόκκινες συνιστώσες του C IV και του Si IV και για τις δύο περιόδους. Για κάθε BALQSO δίνονται: στην 1^η στήλη ο αύξον αριθμός των συνιστωσών στις οποίες έχουν αναλυθεί οι BALs των Si IV και C IV, στις στήλες 2-5 δίνονται τα ισοδύναμα εύρη των μπλε και κόκκινων συνιστωσών για τον C IV και για τις δύο εποχές, στις στήλες 6-9 δίνονται τα ίδια αλλά για τις συνιστώσες του Si IV.

	1. J114548.38+ 393746.6										
	C IV 1st epoch C IV 2nd epoch Si IV 1st epoch				Si IV 2nd epoch						
Component	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW			
component	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)			
1	1.43 ± 0.11	0.83 ± 0.07	1.78 ± 0.14	1.03 ± 0.08	0.22 ± 0.02	0.13 ± 0.01	0.57 ± 0.05	0.34 ± 0.03			
2	2.99 ± 0.12	2.91±0.12	2.80 ± 0.11	2.80 ± 0.11	1.67 ± 0.07	1.66 ± 0.07	2.20 ± 0.09	2.20 ± 0.09			
3	0.98 ± 0.09	0.80 ± 0.07	1.05 ± 0.09	0.80 ± 0.07	2.30 ± 0.11	1.82 ± 0.16	3.22 ± 0.16	3.06 ± 0.28			
4	1.19 ± 0.09	0.96 ± 0.08	1.14 ± 0.09	0.86 ± 0.07	1.17 ± 0.09	0.98 ± 0.08	1.78 ± 0.14	1.48 ± 0.12			
5	2.03 ± 0.10	1.64 ± 0.08	2.09 ± 0.10	1.54 ± 0.08	1.15 ± 0.06	0.84 ± 0.04	1.29 ± 0.06	0.96 ± 0.05			
6	1.04 ± 0.08	0.77 ± 0.06	1.28 ± 0.10	0.80 ± 0.06	0.29 ± 0.02	0.29 ± 0.02	0.45 ± 0.04	0.36 ± 0.03			
7	1.34 ± 0.11	1.30 ± 0.10	1.77 ± 0.14	1.33 ± 0.11	0.22 ± 0.02	0.15 ± 0.01	0.34 ± 0.03	0.20 ± 0.02			
8	0.55 ± 0.05	0.45 ± 0.04	1.09 ± 0.10	0.80 ± 0.07	0.18 ± 0.02	0.15 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.15 ± 0.01			

Total	10.04 ± 0.27	8.61±0.23	11.19 ± 0.31	8.94 ± 0.24	6.16 ± 0.17	5.26 ± 0.20	7.84 ± 0.25	6.55 ± 0.33
			2. J1	01056.69+355833.3	5			
	C IV 1st	t epoch	C IV 2nd	l epoch	Si IV 1s	t epoch	Si IV 2n	d epoch
Component	EW (blue)	EW (red)	EW (blue)	EW (red)	EW (blue)	EW (red)	EW (blue)	EW (red)
1	0.92±0.07	0.92±0.07	0.81±0.07	0.78±0.06	0.22±0.02	0.22±0.02	0.15±0.01	0.13±0.01
2	3.39±0.14	3.39±0.14	3.00 ± 0.12	2.93±0.12	4.05±0.16	4.05±0.16	3.23±0.13	3.12±0.12
3	2.09±0.10	2.09±0.10	2.01±0.10	1.94 ± 0.10	4.27±0.21	4.27±0.21	3.74±0.19	3.88±0.19
4	3.34±0.13	1.85 ± 0.07	3.49 ± 0.14	2.01±0.08	1.26 ± 0.05	0.70 ± 0.03	1.58 ± 0.06	0.80 ± 0.03
5	3.49±0.14	1.91±0.06	3.49 ± 0.10	1.91±0.06	1.36 ± 0.04	0.71±0.02	1.66 ± 0.05	0.91±0.03
6	4.03±0.12	2.51±0.08	3.54±0.11	3.28±0.10	1.52 ± 0.05	0.89±0.03	1.44 ± 0.04	1.44 ± 0.04
7	2.22±0.11	2.16 ± 0.11	2.51±0.13	2.28 ± 0.11	1.19 ± 0.06	1.19 ± 0.06	1.56 ± 0.08	1.56 ± 0.08
8	0.89 ± 0.07	0.89 ± 0.07	0.78±0.06	0.66 ± 0.05	1.23 ± 0.10	1.23 ± 0.10	1.51±0.12	1.23 ± 0.10
9	1.20 ± 0.08	1.20 ± 0.08	1.20 ± 0.08	1.14 ± 0.08	1.42 ± 0.10	1.42 ± 0.10	1.92 ± 0.13	1.77±0.12
10	2.47 ± 0.12	2.41±0.12	2.92±0.15	2.43±0.12	0.71±0.04	0.67±0.03	1.54 ± 0.08	1.32 ± 0.07
11	n/a	n/a	1.87 ± 0.17	1.32±0.13	n/a	n/a	1.09 ± 0.10	0.68 ± 0.06
12	n/a	n/a	1.3 ± 0.17	0.9±0.17	n/a	n/a	1.09 ± 0.17	1.32 ± 0.13
Total	20.40 ± 0.35	17.09±0.30	21.58±0.39	18.8 ± 0.32	15.05±0.32	13.29±0.31	18.11±0.34	15.00 ± 0.31
			3. J1	14704.46+153243.3	}		•	
	C IV 1st	t epoch	C IV 2nd epoch		Si IV 1st epoch		Si IV 2nd epoch	
Component	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW
component	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)
1	0.17±0.02	0.17 ± 0.02	0.10±0.01	0.07±0.01	0.13±0.01	0.13±0.01	0.13 ± 0.01	0.07 ± 0.01
2	0.15 ± 0.02	0.11 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.19 ± 0.02	0.19 ± 0.02	0.17 ± 0.02	0.17 ± 0.02
3	0.56 ± 0.07	0.34 ± 0.04	0.53 ± 0.06	0.34 ± 0.04	0.24 ± 0.03	0.24 ± 0.03	0.24 ± 0.03	0.24 ± 0.03
4	2.33 ± 0.12	1.97 ± 0.10	2.29 ± 0.11	2.12 ± 0.11	1.03 ± 0.05	1.03 ± 0.05	1.08 ± 0.05	1.08 ± 0.05
5	1.40 ± 0.08	1.40 ± 0.08	1.27 ± 0.08	1.23 ± 0.07	1.51 ± 0.09	1.51 ± 0.09	1.62 ± 0.10	1.62 ± 0.10
6	2.69 ± 0.13	1.63 ± 0.08	2.53 ± 0.13	1.79 ± 0.09	0.83 ± 0.04	0.72 ± 0.04	1.39 ± 0.07	0.72 ± 0.04
7	1.40 ± 0.10	1.11 ± 0.08	1.19 ± 0.08	0.71 ± 0.05	1.00 ± 0.07	0.54 ± 0.04	0.86 ± 0.06	0.45 ± 0.03
8	1.63 ± 0.13	1.52 ± 0.08	1.83 ± 0.09	1.83±0.09	2.45 ± 0.12	1.41 ± 0.07	2.24 ± 0.11	1.28 ± 0.06
9	1.71 ± 0.10	0.92 ± 0.06	1.78±0.11	0.96 ± 0.06	0.38 ± 0.02	0.20 ± 0.01	0.57 ± 0.03	0.30 ± 0.02
10	1.03 ± 0.07	0.88 ± 0.06	1.07 ± 0.08	0.76 ± 0.05	0.76 ± 0.05	0.40 ± 0.03	0.44 ± 0.03	0.31 ± 0.02

11	1 23+0 07	0.83+0.05	050+003	0.40+0.02	0.96±0.06	0.49+0.03	0.49+0.03	0.49+0.03
11	1.23 ± 0.07 2 19 \pm 0 11	1.88 ± 0.09	0.30 ± 0.03	1.40 ± 0.02	1.28 ± 0.06	0.49 ± 0.03	0.49 ± 0.03	0.49 ± 0.03
12	1.62 ± 0.13	1.00 ± 0.09	1.05 ± 0.09	1.47 ± 0.07 1.05 ± 0.09	1.20 ± 0.00	0.03 ± 0.04	0.73 ± 0.04	0.50 ± 0.02
13	1.02 ± 0.13	1.00 ± 0.07	1.05 ± 0.07	1.03 ± 0.07	152 ± 0.00	1.22 ± 0.07	1.02 ± 0.05	0.02 ± 0.00
14	2.32 ± 0.13	2.13 ± 0.11	2.20 ± 0.11	1.99 ± 0.10	1.32 ± 0.00	1.32 ± 0.07	1.02 ± 0.03	0.71 ± 0.04
15	4.13±0.08	3.02 ± 0.09	4.10 ± 0.13	5.23 ± 0.10	3.30 ± 0.10	2.77 ± 0.08	2.45 ± 0.07	1.74 ± 0.05
10	1.08±0.08	1.05±0.07	0.94 ± 0.07	0.37 ± 0.04	1.10±0.08	0.78±0.05	0.92±0.06	0.00 ± 0.03
1/	0.92 ± 0.09	0.80 ± 0.08	0.84 ± 0.08	0.84±0.08	0.74 ± 0.07	0.56 ± 0.06	0.48 ± 0.05	0.40 ± 0.04
18	1.38±0.12	1.28±0.11	1.28 ± 0.11	1.22±0.11	0.85±0.08	0.68±0.06	0.64 ± 0.06	0.57 ± 0.05
19	2.58±0.10	1.75±0.09	2.58±0.13	1.39±0.07	0.71±0.04	0.57 ± 0.03	0.95±0.05	0.57 ± 0.03
20	1.68±0.12	1.63±0.11	0.85 ± 0.06	0.50 ± 0.03	0.24±0.02	0.24 ± 0.02	0.21±0.01	0.21 ± 0.01
21	0.76 ± 0.06	0.76 ± 0.06	n/a	n/a	0.24 ± 0.02	0.11 ± 0.01	n/a	n/a
22	0.41 ± 0.05	0.31 ± 0.04	0.11 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.44 ± 0.05	0.44 ± 0.05	0.42 ± 0.05	0.20 ± 0.02
23	0.37 ± 0.04	0.19 ± 0.02	0.14 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.65 ± 0.06	0.38 ± 0.04	0.68 ± 0.07	0.38 ± 0.04
Total	29.35±0.45	23.80 ± 0.36	25.85 <u>+</u> 0.41	20.27 <u>±</u> 0.32	19.51 <u>+</u> 0.30	15.20±0.23	16.88±0.26	12.40 ± 0.20
			4. J15	55335.78+324308.1				
	C IV 1st	t epoch	C IV 2nd	l epoch	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2n	d epoch
Component	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW
component	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)
1	2.66 ± 0.13	2.59 ± 0.10	2.93 ± 0.12	2.93 ± 0.12	0.30 ± 0.01	0.27 ± 0.01	0.38 ± 0.02	0.36 ± 0.01
2	1.09 ± 0.08	0.92 ± 0.06	1.74 ± 0.12	0.96±0.07	0.76±0.05	0.59 ± 0.04	1.13 ± 0.08	1.00 ± 0.07
3	2.77±0.11	2.67±0.11	3.26 ± 0.13	2.55 ± 0.10	0.44 ± 0.02	0.44 ± 0.02	0.68 ± 0.03	0.51 ± 0.02
4	2.01±0.10	1.29 ± 0.06	2.30±0.11	1.75±0.09	0.31±0.02	0.12 ± 0.01	0.40 ± 0.02	0.24 ± 0.01
5	2.82 ± 0.11	1.84 ± 0.07	3.41 ± 0.14	2.56±0.10	0.21 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.60 ± 0.02	0.43 ± 0.02
6	1.08 ± 0.08	1.05 ± 0.07	1.45 ± 0.10	1.37 ± 0.10	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.49 ± 0.03	0.49±0.03
7	0.48 ± 0.06	0.39 ± 0.04	1.57 ± 0.14	1.32 ± 0.12	0.06 ± 0.01	0.03 ± 0.00	0.69 ± 0.06	0.64 ± 0.06
8	0.40 ± 0.04	0.27 ± 0.01	2.20±0.11	1.24 ± 0.06	0.22 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.49 ± 0.02	0.25±0.01
9	0.05±0.01	0.05±0.01	0.15±0.02	0.10 ± 0.01	0.17±0.02	0.10±0.01	0.18±0.02	0.11±0.01
Total	12.01 ± 0.27	10.19±0.21	16.72±0.36	13.28±0.28	2.81 ± 0.07	1.93 ± 0.05	4.88±0.12	3.90±0.10
	•		5. JO)3135.57+003421.2			•	
	C IV 1st	t epoch	C IV 2nd	l epoch	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2n	d epoch
Component	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW
component	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)

1	2 96+0 15	2 96+0 09	328 ± 010	3.08+0.09	0 21+0 01	021+001	032+001	027+001
2	1.67±0.10	1.48+0.09	1 75+0 10	1 57+0.09	1 43+0.09	1 28+0.08	1 37+0.08	128 ± 0.08
3	0.84 ± 0.08	0.71+0.07	0.81+0.08	0.66±0.07	0.13+0.01	0.13+0.01	0.20 ± 0.02	0.20 ± 0.02
3	0.04 ± 0.00	0.71 ± 0.07 2 10±0 11	0.01 ± 0.00	0.00 ± 0.07	1.04 ± 0.01	1.02 ± 0.01	1.20 ± 0.02	0.20 ± 0.02
	2.22 ± 0.11	2.19 ± 0.11	2.52 ± 0.12	2.52 ± 0.12	1.04 ± 0.03	1.02 ± 0.03	1.20 ± 0.00	1.20 ± 0.00
5	2.00 ± 0.10	1.01±0.09	2.00 ± 0.10	1.00 <u>+</u> 0.09	0.40 ± 0.02	0.40 ± 0.02	0.54 ± 0.03	0.42 ± 0.02
0	1.38±0.14	1.06±0.08	1.48±0.12	1.30 ± 0.10	0.14±0.01	0.10 ± 0.01	0.25 ± 0.02	0.23 ± 0.02
7	2.07 ± 0.10	1.84±0.09	2.33±0.12	1.61 ± 0.08	0.78±0.04	0.69±0.03	1.36±0.07	0.92 ± 0.05
8	0.49 ± 0.05	0.34 ± 0.03	0.43 ± 0.04	0.38 ± 0.04	0.66 ± 0.07	0.44 ± 0.04	0.59 ± 0.06	0.54 ± 0.05
9	1.93 ± 0.12	1.45 ± 0.07	2.33 ± 0.12	1.49 ± 0.07	0.83 ± 0.04	0.62 ± 0.03	1.18 ± 0.06	0.78 ± 0.04
10	1.54 ± 0.11	1.18 ± 0.07	2.33±0.14	1.68 ± 0.10	0.33±0.02	0.23 ± 0.01	0.39±0.02	0.27 ± 0.02
11	1.06 ± 0.11	0.77 ± 0.08	0.72 ± 0.07	0.46 ± 0.05	0.11 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.25 ± 0.03	0.20 ± 0.02
12	0.37 ± 0.04	0.28 ± 0.03	0.79 ± 0.08	0.79 ± 0.08	0.26 ± 0.03	0.11 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.11 ± 0.01
Total	16.13±0.37	14.41±0.27	17.71±0.36	15.38±0.29	5.99 <u>±</u> 0.14	5.12 ± 0.12	7.19±0.16	6.04 ± 0.14
			6. JO	23252.80-001351.1				
	C IV 1s	t epoch	C IV 2nd	l epoch	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2r	nd epoch
Component	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW
component	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)
1	1.36 ± 0.08	1.35 ± 0.08	1.62 ± 0.10	1.62 ± 0.10	0.17 ± 0.01	0.17 ± 0.01	0.45 ± 0.03	0.30 ± 0.02
2	1.91 ± 0.15	1.21 ± 0.06	2.26 ± 0.11	1.35 ± 0.07	0.53 ± 0.03	0.31 ± 0.02	$0.70 {\pm} 0.04$	0.52 ± 0.03
3	0.25 ± 0.02	0.25 ± 0.02	0.48 ± 0.05	0.35 ± 0.04	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.04 ± 0.00
4	2.06 ± 0.10	1.39 ± 0.07	2.28 ± 0.11	1.51 ± 0.08	0.36±0.02	0.26 ± 0.01	0.44 ± 0.02	0.32 ± 0.02
5	0.76 ± 0.08	0.64 ± 0.06	0.87±0.09	0.87±0.09	0.18 ± 0.02	0.15 ± 0.01	0.23 ± 0.02	0.12 ± 0.01
6	0.61 ± 0.06	0.58 ± 0.06	1.23±0.12	0.94 ± 0.09	0.17 ± 0.02	0.17 ± 0.02	0.19 ± 0.02	0.19 ± 0.02
7	0.18 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.33±0.03	0.25±0.03	0.09 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.36 ± 0.04	0.38±0.04
8	2.00 ± 0.12	1.46 ± 0.09	2.36 ± 0.14	1.72±0.10	0.25 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.36 ± 0.02	0.25 ± 0.01
9	0.80±0.08	0.78±0.08	0.99±0.10	0.95±0.10	0.28+0.03	0.14±0.01	0.27±0.03	0.16+0.02
Total	11.32+0.27	7.60+0.19	11.81+0.30	9.38+0.24	2.00+0.06	1.50+0.04	2.96+0.08	2.23+0.07
			7.10	85746.61+513444.4				
	C IV 1s	t epoch	C IV 2nd	lepoch	Si IV 1s	st epoch	Si IV 2r	nd epoch
<u> </u>	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW
Component	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)
1	0.41 ± 0.05	0.21±0.03	1.11±0.13	0.96 ± 0.11	0.22 ± 0.03	0.11±0.01	0.46 ± 0.06	0.41 ± 0.05

2	0.52 ± 0.06	0.27 ± 0.03	0.86 ± 0.10	0.86 ± 0.10	0.28 ± 0.03	0.14 ± 0.02	0.19 ± 0.02	0.19 ± 0.02
3	1.96 ± 0.14	1.18 ± 0.08	1.91±0.13	1.33 ± 0.09	0.89 ± 0.06	0.53 ± 0.04	0.64 ± 0.04	0.53 ± 0.04
4	0.63 ± 0.06	0.40 ± 0.04	0.72 ± 0.07	0.39 ± 0.04	0.48 ± 0.05	0.30 ± 0.03	0.17 ± 0.02	0.10 ± 0.01
5	2.53 ± 0.13	1.56 ± 0.08	2.11±0.11	1.66 ± 0.08	1.95 ± 0.10	1.23 ± 0.06	1.71±0.09	1.49 ± 0.07
6	1.43 ± 0.11	0.83 ± 0.07	1.14 ± 0.09	1.12 ± 0.09	2.00±0.16	1.28 ± 0.10	1.85±0.09	1.57±0.13
7	1.41 ± 0.10	1.05 ± 0.07	1.76 ± 0.12	1.03 ± 0.07	0.34±0.02	0.21±0.01	0.13 ± 0.01	0.07 ± 0.00
8	0.77 ± 0.09	0.71±0.09	0.88 ± 0.11	0.58 ± 0.07	0.22 ± 0.03	0.16 ± 0.02	0.23 ± 0.03	0.21±0.03
Total	8.12±0.28	5.50 ± 0.19	8.83±0.31	7.07±0.24	5.71±0.21	3.75±0.13	5.12 ± 0.15	4.42 ± 0.17
		•	8. J1	12742.98+022441.8	}			•
	C IV 1s	t epoch	C IV 2nd	d epoch	Si IV 1s	t epoch	Si IV 2n	d epoch
Component	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW
component	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)
1	0.33 ± 0.04	0.33 ± 0.04	0.22 ± 0.03	0.22 ± 0.03	0.58 ± 0.07	0.34 ± 0.04	0.71 ± 0.09	0.39 ± 0.05
2	0.51 ± 0.06	0.44 ± 0.05	1.00 ± 0.12	0.51 ± 0.06	0.34 ± 0.04	0.34 ± 0.04	0.62 ± 0.07	0.34 ± 0.04
3	0.73 ± 0.09	0.51 ± 0.06	1.40 ± 0.17	1.27 ± 0.15	0.20 ± 0.02	0.20 ± 0.02	0.48 ± 0.06	0.29 ± 0.04
4	0.73 ± 0.09	0.58 ± 0.07	0.80 ± 0.10	0.66 ± 0.08	0.48 ± 0.06	0.15 ± 0.02	$0.80 {\pm} 0.10$	0.76 ± 0.09
5	2.91±0.15	1.60 ± 0.06	2.74 ± 0.11	1.47 ± 0.06	0.61 ± 0.02	0.27 ± 0.01	0.61 ± 0.02	0.27 ± 0.01
6	2.45 ± 0.12	2.39 ± 0.12	1.97 ± 0.10	1.97 ± 0.10	0.71 ± 0.04	0.71 ± 0.04	0.71 ± 0.04	0.71 ± 0.04
7	1.49±0.13	0.93 ± 0.07	1.49 ± 0.12	0.99 ± 0.08	1.52 ± 0.12	0.85 ± 0.07	0.81±0.06	0.76 ± 0.06
8	1.55 ± 0.09	1.12 ± 0.07	1.55 ± 0.09	1.12 ± 0.07	1.76 ± 0.11	1.38 ± 0.08	1.25 ± 0.08	1.12 ± 0.07
9	2.11±0.11	1.70 ± 0.08	2.16±0.11	1.93 ± 0.10	2.05 ± 0.10	1.52 ± 0.08	2.12±0.11	1.15 ± 0.06
10	3.18±0.16	1.97 ± 0.10	2.22±0.11	1.91 ± 0.10	1.23 ± 0.06	0.67±0.03	1.26 ± 0.06	0.79 ± 0.04
11	2.39±0.12	1.79±0.09	1.91±0.10	1.00 ± 0.05	0.48 ± 0.02	0.48 ± 0.02	1.17 ± 0.06	0.61±0.03
Total	17.11±0.37	12.72±0.25	16.40±0.36	12.42±0.28	9.43±0.23	6.66±00.16	10.16±0.24	6.99±0.17
		·	9. J1	13527.25+385744.1		•	·	·
	C IV 1s	t epoch	C IV 2nd	d epoch	Si IV 1s	t epoch	Si IV 2n	d epoch
Component	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW
Component	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)	(blue)	(red)
1	1.25 ± 0.04	1.18±05	2.57 ± 0.18	2.57 ± 0.18	0.13 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.88 ± 0.06	0.44 ± 0.03
2	2.86 ± 0.11	1.54 ± 0.06	3.34 ± 0.13	2.68 ± 0.11	1.06 ± 0.04	0.62 ± 0.02	3.00 ± 0.12	3.00 ± 0.12
3	2.69±0.13	1.93 ± 0.10	1.93 ± 0.10	1.15 ± 0.06	2.21±0.11	2.21±0.11	1.98 ± 0.10	2.01 ± 0.10

4	2.81±0.11	2.76 ± 0.11	3.88±0.16	3.23 ± 0.13	1.74 ± 0.07	1.51 ± 0.06	1.29 ± 0.05	0.68 ± 0.03
5	3.56 ± 0.18	2.05 ± 0.10	0.58 ± 0.03	0.52 ± 0.03	1.36 ± 0.07	1.01 ± 0.05	1.01 ± 0.05	0.49 ± 0.02
6	0.58 ± 0.07	0.58 ± 0.07	0.93±0.11	0.73 ± 0.09	0.48 ± 0.06	0.43 ± 0.05	0.93 ± 0.11	0.63 ± 0.08
7	0.87 ± 0.10	0.70 ± 0.06	1.71±0.14	1.71 ± 0.14	0.53 ± 0.04	0.45 ± 0.04	1.01 ± 0.08	0.98 ± 0.08
8	1.84 ± 0.13	1.80 ± 0.13	1.14 ± 0.08	0.82 ± 0.06	0.47 ± 0.03	0.31 ± 0.02	0.27 ± 0.02	0.14 ± 0.01
Total	13.18±0.32	10.20 ± 0.25	13.86 ± 0.35	11.92±0.31	7.36 ± 0.17	6.18 ± 0.15	9.24±0.23	7.60 ± 0.20
			10. JO	91307.83+442014.	3			
	C IV 1st	t epoch	C IV 2nd	l epoch	Si IV 1s	t epoch	Si IV 2n	ld epoch
Component	EW (blue)	EW (red)	EW (blue)	EW (red)	EW (blue)	EW (red)	EW (blue)	EW (red)
1	1.13 ± 0.10	1.13 ± 0.10	1.41±0.13	1.36 ± 0.12	0.62 ± 0.06	0.52 ± 0.05	0.74 ± 0.07	0.59 ± 0.05
2	2.21±0.11	1.50 ± 0.08	2.35±0.12	1.61±0.08	1.65 ± 0.08	1.64 ± 0.08	2.22±0.11	2.17±0.11
3	1.69 ± 0.10	1.60 ± 0.10	1.63 ± 0.10	1.63 ± 0.10	2.32 ± 0.14	2.31±0.14	2.32 ± 0.14	2.33±0.14
4	1.83 ± 0.11	1.16 ± 0.07	1.76 ± 0.11	1.09 ± 0.07	2.25 ± 0.13	2.31 ± 0.14	2.32 ± 0.12	2.32 ± 0.14
5	1.65 ± 0.12	1.37 ± 0.10	1.35 ± 0.09	1.34 ± 0.09	0.44 ± 0.03	0.23 ± 0.02	0.43 ± 0.03	0.27 ± 0.02
6	0.59 ± 0.07	0.54 ± 0.07	0.58 ± 0.07	0.46 ± 0.06	0.28 ± 0.03	0.25 ± 0.03	0.16 ± 0.02	0.09 ± 0.01
7	0.32 ± 0.04	0.32 ± 0.04	0.27 ± 0.03	0.23 ± 0.03	0.33 ± 0.04	0.18 ± 0.02	0.21 ± 0.03	0.00 ± 0.00
8	1.22 ± 0.07	1.23 ± 0.07	1.27 ± 0.08	1.24 ± 0.07	0.58 ± 0.04	0.60 ± 0.04	0.52 ± 0.03	0.49 ± 0.03
9	0.42 ± 0.05	0.38 ± 0.05	0.50 ± 0.06	0.34 ± 0.04	0.26 ± 0.03	0.28 ± 0.03	0.21 ± 0.02	0.17 ± 0.02
10	0.40 ± 0.05	0.40 ± 0.05	0.37 ± 0.04	0.37 ± 0.04	0.88 ± 0.11	0.74 ± 0.09	0.88 ± 0.11	0.44 ± 0.05
11	1.67 ± 0.13	1.36 ± 0.11	1.71 ± 0.14	1.64 ± 0.13	1.27 ± 0.10	0.83 ± 0.07	1.16 ± 0.09	0.61 ± 0.05
12	1.83 ± 0.13	1.06 ± 0.07	1.89 ± 0.13	1.16 ± 0.08	1.53 ± 0.11	1.53 ± 0.11	1.51 ± 0.11	1.48 ± 0.10
13	2.11 ± 0.11	1.63 ± 0.08	2.14 ± 0.11	1.60 ± 0.08	2.29 ± 0.11	2.21 ± 0.11	2.25 ± 0.11	2.23 ± 0.11
14	1.60 ± 0.11	1.28 ± 0.09	1.68 ± 0.12	1.49 ± 0.10	1.56 ± 0.11	1.56 ± 0.11	1.56 ± 0.11	1.56 ± 0.11
15	2.11 ± 0.11	1.72 ± 0.09	2.09 ± 0.10	1.51 ± 0.08	1.61 ± 0.08	0.98 ± 0.05	1.94 ± 0.10	1.16 ± 0.06
16	1.72 ± 0.12	1.22 ± 0.09	1.70 ± 0.12	1.39 ± 0.10	0.89 ± 0.06	0.82 ± 0.06	1.05 ± 0.07	0.78 ± 0.05
17	0.68 ± 0.08	0.53 ± 0.06	0.95 ± 0.11	0.75 ± 0.09	0.91 ± 0.11	$0.84 {\pm} 0.10$	1.00 ± 0.12	0.79 ± 0.09
18	2.19±0.11	1.26 ± 0.06	2.06 ± 0.10	1.12 ± 0.06	0.74 ± 0.04	0.56 ± 0.03	0.46 ± 0.02	0.43±0.02
19	0.42 ± 0.05	0.40 ± 0.05	0.17 ± 0.02	0.17 ± 0.02	0.46 ± 0.06	0.27 ± 0.03	0.17 ± 0.02	0.19 ± 0.02
20	0.42 ± 0.05	0.42 ± 0.05	0.18 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.40 ± 0.05	0.40 ± 0.05	0.10 ± 0.01	0.05 ± 0.01
Total	22.99±0.43	18.65 ± 0.34	22.77 ± 0.43	18.63 ± 0.35	18.90 ± 0.37	16.94 ± 0.35	18.47 ± 0.38	15.72±0.33

Στους πίνακες 6.6-6.9 δίνονται για τους υπόλοιπους 10 BALQSOs, στους οποίους δεν μελετάται η μεταβλητότητα, οι τιμές των παραμέτρων V_{rad}, FWHM, τ₀ και EW.

Πίνακας 6.6. Ακτινικές ταχύτητες απομάκρυνσης (V_{rad} σε km/s) των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του C IV και του Si IV. Για κάθε BALQSO δίνονται: στην 1^η στήλη ο αύξον αριθμός των συνιστωσών στις οποίες έχουν αναλυθεί οι BALs του C IV και του Si IV, στις στήλες 2-3 δίνονται οι ταχύτητες απομάκρυνσης των μπλε και κόκκινων συνιστωσών τουC IV, στις στήλες 4-5 δίνονται οι ταχύτητες απομάκρυνσης των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του Si IV, στην 6^η στήλη δίνεται η μέση τιμή μεταξύ των ταχυτήτων των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του Si IV, στην 6^η στήλη δίνεται η μέση τιμή μεταξύ των ταχυτήτων των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του Si IV, στην 6^η στήλη δίνεται η μέση τιμή μεταξύ των ταχυτήτων των μπλε και κόκκινων συνιστωσών των Si IV, στην 6^η στήλη δίνεται η μέση τιμή μεταξύ των ταχυτήτων των μπλε και κόκκινων συνιστωσών των Si IV, στην 6^η στήλη δίνεται η μέση τιμή μεταξύ των ταχυτήτων των μπλε και κόκκινων συνιστωσών των Si IV, στην 6^η στήλη δίνεται η μέση τιμή μεταξύ των ταχυτήτων των μπλε και κόκκινων συνιστωσών των Si IV, στην 6^η στήλη δίνεται η μέση τιμή μεταξύ των ταχυτήτων των μπλε και κόκκινων συνιστωσών των Si IV και C IV.

			11. J151601.51+430931.4		
	С	IV	Si	IV	Μέση τιμή
	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	$< V_{rad} >$
1	-1630 ± 210	-1590 ± 280	-1730±210	-1770 ± 140	-1680 ± 430
2	-7180±140	-7180±140	-7170±140	-7190±210	-7180±320
3	-7490±140	-7490±210	-7520±70	-7540 ± 280	-7510±380
4	-8370±210	-8370±140	-8290±140	-8310±70	-8340±300
5	-8970±210	-9030±280	-9020±140	-8980±140	-9000±400
6	-9410±140	-9410±210	-9400±140	-9350±210	-9390±360
7	-9930±140	-9910±140	-9910±70	-9910±280	-9920±350
8	-10450 ± 140	-10450±210	-10490±140	-10490 ± 140	-10470±320
9	-10810 ± 140	-10810±140	-10820±210	-10820 ± 280	-10820 ± 400
10	-11370 ± 210	-11370 ± 140	-11360±280	-11420 ± 140	-11380 ± 400
11	-12130 ± 140	-12150±210	-12120±140	-12120±210	-12130±360
12	-13140 ± 140	-13120±210	-13210±140	-13190 ± 210	-13170±360
13	-13830 ± 210	-13850±140	-13910±140	-13910 ± 280	-13880 ± 400
14	-14150 ± 210	-14170 ± 70	-14200±210	-14230 ± 140	-14190±340
15	-14910 ± 140	-14970 ± 140	-14930 ± 140	-14930 ± 210	-14940 ± 320
16	-15840 ± 140	-15840±210	-15810±210	-15830 ± 140	-15830 ± 360
			12.J023908.98-002121.3		
	С	IV	Si	IV	Μέση τιμή
	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	< V _{rad} >

1	-6010 ± 140	-6010 ± 140	-5930±140	-5890 ± 210	-5960 ± 320
2	-7450 ± 140	-7410 ± 210	-7410±210	-7430 ± 140	-7430 ± 360
3	-8550 ± 70	-8550 ± 210	-8450±70	-8450 ± 140	-8500±270
4	-9450±70	-9450 ± 140	-9290±140	-9270 ± 140	-9370±250
5	-10370 ± 140	-10350 ± 70	-10290±210	-10220 ± 140	-10310 ± 300
6	-11350±70	-11390 ± 140	-11250±280	-11270±210	-11320±380
7	-13430±210	-13410 ± 210	-13280±70	-13280 ± 140	-13350 ± 340
8	-16900 ± 70	-16880 ± 140	-16960 ± 140	-16960 ± 140	-16930 ± 250
9	-20520 ± 140	-20460 ± 70	-20450 ± 210	-20450 ± 210	-20470 ± 340
		1:	3. J015921.53+141043.1		
	C	IV	Si	IV	Μέση τιμή
	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	$< V_{rad} >$
1	-8450 ± 140	-8450 ± 140	-8450±280	-8420 ± 210	-8440 ± 400
2	-9330 ± 140	-9330 ± 140	-9290 ± 140	-9270 ± 140	-9310 ± 280
3	-9730 ± 140	-9730 ± 140	-9690 ± 280	-9730 ± 140	-9720 ± 370
4	-10330 ± 210	-10350 ± 70	-10420 ± 140	-10380 ± 140	-10370 ± 300
5	-10990 ± 210	-10950 ± 140	-11130 ± 210	-11070 ± 140	-11040 ± 360
6	-12050 ± 140	-12050 ± 210	-12160 ± 210	-12160 ± 140	-12110 ± 360
7	-12980 ± 70	-13000 ± 280	-12970 ± 280	-13010 ± 140	-12990 ± 430
8	-13750 ± 140	-13730 ± 140	-13800 ± 140	-13690 ± 210	-13740 ± 320
9	-14620 ± 140	-14620 ± 140	-14680 ± 210	-14650 ± 70	-14640 ± 300
10	-15600 ± 70	-15620 ± 140	-15600 ± 140	-15630 ± 140	-15610 ± 250
11	-16370 ± 210	-16370 ± 210	-16440 ± 140	-16420 ± 140	-16400 ± 360
12	-17070 ± 210	-17070 ± 140	-17120 ± 210	-17120 ± 140	-17100 ± 360
13	-17820 ± 70	-17800 ± 210	-17800 ± 210	-17830 ± 140	-17810 ± 340
14	-18420 ± 70	-18420 ± 140	-18490 ± 140	-18490 ± 210	-18460 ± 300
15	-18930±210	-18930±70	-18940±140	-18920±210	-18930±340
16	-19470 ± 140	-19450 ± 140	-19490 ± 140	-19470 ± 140	-19470 ± 280
17	-20210±280	-20210±210	-20160±140	-20180±70	-20190±380
18	-20870±280	-20870±70	-20870±210	-20870±140	-20870±380
19	-22030±140	-22030±140	-22020±140	-21990±140	-22020±280

	14. J004527.68+143816.1								
	C	IV	Si	IV	Μέση τιμή				
	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	$< V_{rad} >$				
1	-2300±210	-2310±210	-2490±140	-2490±70	-2400 ± 340				
2	-5120±140	-5120±280	-5040±210	-5100±210	-5100±430				
3	-6230±280	-6250±70	-6130±210	-6150±210	-6190±410				
4	-7430±210	-7450±140	-7410±140	-7390±70	-7420±300				
5	-8450±140	-8450±210	-8450±140	-8450±70	-8450±300				
6	-9090±210	-9090±280	-9070±140	-9090±210	-9090±430				
7	-9790±140	-9790±140	-9800±140	-9840±140	-9810±280				
8	-10470 ± 140	-10470±280	-10470 ± 140	-10470 ± 140	-10470±370				
9	-11250±210	-11250 ± 140	-11220±140	-11200±210	-11230±360				
10	-12820±210	-12820±210	-12900±210	-12860 ± 280	-12850 ± 460				
11	-13790±140	-13790±210	-13870±70	-13820±140	-13820±300				
12	-14700±70	-14740±280	-14630±140	-14650 ± 280	-14680±430				
		1!	5. J005419.99+002727.9						
	C	IV	Si	IV	Μέση τιμή				
	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	$< V_{rad} >$				
1	-2260 ± 210	-2260 ± 140	-2290 ± 140	-2290 ± 210	-2280 ± 360				
2	-4250 ± 140	-4250 ± 140	-4290 ± 210	-4290 ± 280	-4270 ± 400				
3	-5380 ± 140	-5380±210	-5390±210	-5340 ± 140	-5370 ± 360				
4	-5710±210	-5690 <u>+</u> 210	-5760 ± 140	-5780 ± 210	-5740 ± 390				
5	-6840 ± 210	-6840 ± 140	-6880±70	-6900 ± 140	-6870 ± 300				
6	-7470 ± 140	-7450 ± 140	-7520 ± 140	-7540 ± 140	-7500 ± 280				
7	-8130±70	-8130 ± 140	-8090 ± 140	-8140 ± 210	-8120 ± 300				
8	-8370 ± 140	-8350 ± 140	-8380±70	-8380 ± 210	-8370 ± 300				
9	-10990±210	-10950±210	-11090±210	-11070±140	-11030±390				
10	-12380±140	-12360±140	-12390±210	-12390±140	-12380±320				
11	-14050 ± 70	-14050 ± 140	-14110±70	-14090 ± 140	-14080±220				
12	-15600±140	-15600 ± 210	-15540 <u>+</u> 70	-15560 ± 140	-15580±300				
13	-18460±140	-18460 ± 210	-18580±210	-18560 ± 140	-18520±360				

	16. J062012.88+833206.9						
	C	IV	Si	IV	Μέση τιμή		
	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	< V _{rad} >		
1	-4270±140	-4230 ± 140	-4340±210	-4340±70	-4300±300		
2	-5060±210	-5080 ± 140	-5080±280	-5080±140	-5080±400		
3	-5550±280	-5530 ± 140	-5520±140	-5520±210	-5530 ± 400		
4	-5930±140	-5970 ± 140	-5870±280	-5870±280	-5910±440		
5	-6640±140	-6700±210	-6750±140	-6750±140	-6710±320		
6	-7160±140	-7220 <u>+</u> 70	-7170±210	-7170±210	-7180±340		
7	-7670±210	-7670±140	-7690±210	-7690±140	-7680±360		
8	-8150±140	-8150±140	-8180±280	-8160±280	-8160±440		
9	-8530±210	-8510 ± 140	-8510±140	-8510±210	-8520±360		
10	-11790 ± 140	-11770±140	-11850±210	-11850±140	-11820±320		
11	-12800±70	-12780 <u>+</u> 210	-12740±140	-12740 <u>+</u> 210	-12770±340		
12	-15900±140	-15900±210	-15900±140	-15940±140	-15910±320		
13	-16470±210	-16470±140	-16440±210	-16460±140	-16460 ± 360		
14	-17040 ± 70	-17040 ± 70	-16990±210	-16990±210	-17020±310		
15	-18070±140	-18070±140	-18170±140	-18170±210	-18120±320		
16	-19380±210	-19380±140	-19420±140	-19420 <u>±</u> 140	-19400±320		
			17. J223841.89+142154.9				
	C	IV	Si	IV	Μέση τιμή		
	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	$< V_{rad} >$		
1	-1730 ± 280	-1790 ± 70	-1750 ± 280	-1770 ± 140	-1760 ± 430		
2	-2280 ± 140	-2300 ± 210	-2270 ± 70	-2230±140	-2270 ± 300		
3	-3630 ± 280	-3590 ± 140	-3610 ± 140	-3610±210	-3610 ± 400		
4	-4630 ± 140	-4630 ± 140	-4600 ± 210	-4600 ± 210	-4620 ± 360		
5	-5460 ± 210	-5460±210	-5470±280	-5500 ± 140	-5470±430		
6	-7330±210	-7280±280	-7170±140	-7210±70	-7250±380		
7	-9150±280	-9150±140	-9180±210	-9150±140	-9160±400		
8	-10990 ± 140	-10990 ± 280	-11070 ± 140	-11070±210	-11030±400		
			18. J022844.09+000217.0				

	С	IV	Si	IV	Μέση τιμή
	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	$< V_{rad} >$
1	-4880 ± 210	-4880 ± 140	-4880±280	-4930±140	-4890 ± 400
2	-6230±140	-6210±210	-6290±210	-6290±280	-6260±430
3	-7930±140	-7970±210	-8000 ± 140	-8070 ± 140	-7990±320
4	-8970±210	-8970±280	-8870±210	-8820±210	-8910±460
5	-9870±210	-9890±140	-9840±140	-9800 ± 140	-9850±320
6	-10590 ± 140	-10570±210	-10470±140	-10470 ± 140	-10530 ± 320
7	-11910 ± 140	-11910 ± 140	-11960 ± 210	-11890 ± 210	-11920 ± 360
8	-13000 ± 140	-13000 ± 140	-12950±210	-12950 ± 210	-12980 ± 360
9	-14110 ± 140	-14110±210	-14070±140	-14110±140	-14100 ± 320
		1	9. J141546.24+112943.4		
	C	IV	Si	IV	Μέση τιμή
	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	$< V_{rad} >$
1	-3630 ± 140	-3650 ± 140	-3770±140	-3730 ± 140	-3700 ± 280
2	-4750 ± 140	-4750 ± 140	-4710 ± 210	-4750 ± 210	-4740 ± 360
3	-5830 ± 210	-5850 ± 140	-5910±210	-5910 ± 140	-5880 ± 360
4	-6360±210	-6360 ± 140	-6370±140	-6290±70	-6350 ± 300
5	-6860 ± 140	-6860 ± 140	-6810 ± 140	-6860 ± 140	-6850 ± 280
6	-7220 ± 140	-7240±210	-7230±210	-7280 ± 140	-7240 ± 360
7	-7670 ± 140	-7730±280	-7740 ± 210	-7720 ± 140	-7720 ± 400
8	-8330 ± 140	-8330±70	-8270 ± 140	-8290 ± 70	-8310±220
9	-9510 ± 140	-9510 ± 140	-9600 ± 70	-9600 ± 140	-9560 ± 250
10	-10850 ± 140	-10850 ± 210	-10840 ± 140	-10840 ± 210	-10850 ± 360
11	-12860 ± 140	-12760 ± 280	-12860 ± 210	-12880 ± 280	-12840 ± 470
		2	0. J135559.03-002413.6		
	С	IV	Si	IV	Μέση τιμή
	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	V _{rad} (blue)	V _{rad} (red)	< V _{rad} >
1	-5430±210	-5470±140	-5470±140	-5430±140	-5450±320
2	-5960 ± 280	-5970±280	-6000±280	-5960 ± 140	-5970±500
3	-6440±70	-6440±140	-6460±140	-6440±140	-6450±250

4	-6970 ± 140	-6960 ± 210	-6970 ± 210	-6970 ± 210	-6970±390
5	-7340 ± 210	-7330 ± 210	-7340 ± 210	-7340 ± 140	-7340 ± 390
6	-7780 ± 280	-7750 ± 280	-7800 ± 280	-7780 ± 210	-7780 ± 530
7	-8340 ± 140	-8370 ± 140	-8290 ± 140	-8340 ± 140	-8340 ± 280
8	-8760±280	-8730 ± 210	-8760 ± 210	-8760 ± 70	-8750 ± 410
9	-9310±140	-9230 ± 140	-9310 ± 140	-9310 ± 140	-9290 ± 280
10	-9860±210	-9930 ± 140	-9840±140	-9860 ± 210	-9870 ± 360

Πίνακας 6.7. Εύρη (FWHM σε km/s) των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του C IV και του Si IV. Για κάθε BALQSO δίνονται: στην 1^η στήλη ο αύξον αριθμός των συνιστωσών στις οποίες έχουν αναλυθεί οι BALs του C IV και του Si IV, στις στήλες 2-3 δίνονται τα FWHM των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του C IV, στην στήλη 4 δίνεται το <FWHM> μεταξύ μπλε και κόκκινης συνιστώσας, στις στήλες 5-6 δίνονται τα FWHM των μπλε και κόκκινων κόκκινων συνιστωσών του Si IV, στην στήλη 6^η στήλη δίνεται το <FWHM> μεταξύ μπλε και κόκκινης συνιστώσας.

	11. J151601.51+430931.4							
	C IV				Si IV			
	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >		
1	280±40	280±40	280±60	280±30	280±50	280±60		
2	570 ± 50	570 ± 60	570 <u>±</u> 80	320±40	320±60	320±70		
3	900±60	900±70	900±90	560 ± 50	560 ± 40	560 ± 60		
4	670±40	670±50	670±60	460 ± 50	460±30	460±60		
5	740 ± 30	740 ± 40	740±50	590±30	590±40	590±50		
6	950±40	950±50	950±60	620±50	620±50	620±70		
7	950±50	950±60	950±80	560 ± 40	560±40	560 ± 60		
8	690±30	690±40	690±50	560 ± 50	560±30	560 ± 60		
9	620±40	620±30	620±50	430±60	430±40	430±70		
10	710 ± 50	710 ± 40	710±60	480±40	480±50	480±60		
11	710 ± 40	710 ± 50	710±60	480±30	480±60	480±70		
12	1020 ± 50	1020±30	1020 ± 60	750±40	750 <u>±</u> 40	750±60		
13	620±50	620±40	620±60	460±50	460±30	460±60		
14	500 ± 40	500 ± 50	500 ± 60	400±40	400 <u>±</u> 40	400±60		

15	570 ± 50	570 ± 40	570 ± 60	300±30	300 ± 50	300 ± 60			
16	950±60	950±50	950±80	430±40	430 <u>±</u> 30	430±50			
	12.J023908.98-002121.3								
		C IV		Si IV					
	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >			
1	1680 ± 40	1680 ± 50	1680 ± 60	1260 ± 60	1260 ± 40	1260±70			
2	1450 ± 50	1450 <u>±</u> 60	1450 ± 80	1100 ± 40	1100 ± 50	1100 ± 60			
3	1410 ± 50	1410 ± 40	1410 ± 60	1100 ± 50	1100 ± 50	1100 ± 70			
4	1500 ± 40	1500 ± 30	1500 ± 50	1160 ± 60	1160 ± 40	1160±70			
5	950±40	950±40	950±60	770±40	770±50	770 <u>±</u> 60			
6	1150 ± 40	1150 ± 50	1150 ± 60	800±50	800 ± 60	800 ± 80			
7	2530 ± 50	2530 ± 40	2530 ± 60	1590 ± 30	1590 ± 40	1590 ± 50			
8	1960±60	1960 <u>±</u> 50	1960±80	1310 ± 40	1310 ± 30	1310±50			
9	2530 ± 30	2530 <u>+</u> 40	2530 ± 50	1100 ± 50	1100 ± 40	1100 ± 60			
	13. J015921.53+141043.1								
		C IV		Si IV					
	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >			
1	1270 <u>+</u> 40	1270±50	1270 ± 60	1100 ± 40	1100 ± 50	1100 ± 60			
2	1220 ± 40	1220 ± 40	1220 ± 60	800 ± 50	800 ± 50	800±70			
3	670 ± 50	670 ± 50	670 ± 70	480 ± 50	480 ± 40	480±60			
4	1410 ± 60	1410 ± 60	1410 ± 80	1050 ± 40	1050 ± 40	1050 ± 60			
5	740 ± 40	740 ± 40	740 ± 60	460±50	460 ± 40	460±60			
6	900±30	900±30	900 ± 40	590 <u>±</u> 60	590 <u>±</u> 50	590 ± 80			
7	1080 ± 40	1080 ± 40	1080 ± 60	850±40	850 ± 60	850±70			
8	990±50	990±40	990±60	770 <u>±</u> 30	770 <u>±</u> 40	770±50			
9	990±40	990±50	990±60	720±40	720 ± 50	720±60			
10	1110 ± 50	1110±60	1110±80	1100 ± 50	1100 ± 40	1100 ± 60			
11	990±60	990±40	990±70	850 ± 50	850±50	850±70			
12	710±40	710±30	710±50	590±40	590±50	590±60			
13	900±30	900±40	900±50	620±40	620±40	620±60			
14	530 ± 40	530 ± 50	530 ± 60	430±40	430±50	430±60			

15	620±50	620±30	620±60	460±50	460±60	460±80
16	900±40	900±40	900±60	620±30	620±40	620±50
17	530±40	530±50	530±60	320±40	320±30	320±50
18	900±50	900±40	900±60	590±50	590 ± 40	590±60
19	900±60	900±50	900±80	560 ± 40	560 ± 50	560±60
			14. J004527.68+1	43816.1		
		C IV			Si IV	
	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >
1	2280 ± 40	2280 ± 50	2280 ± 60	1510 ± 50	1510 ± 50	1510±70
2	1590 ± 30	1590 <u>+</u> 40	1590 ± 50	1230 ± 50	1230 ± 40	1230 <u>+</u> 60
3	1360 ± 40	1360 ± 50	1360 ± 60	1050 ± 40	1050 ± 40	1050 ± 60
4	810 ± 50	810±60	810 ± 80	560 ± 50	560 ± 40	560 ± 60
5	620±40	620±40	620 ± 60	480±60	480 ± 50	480±80
6	640 ± 60	640±30	640 ± 70	460±40	460 ± 50	460±60
7	900±40	900±40	900±60	690±30	690±30	690±40
8	810±30	810±50	810±60	590±40	590 ± 50	590±60
9	1360 ± 40	1360±50	1360±60	1000 ± 50	1000 ± 40	1000±60
10	1610±50	1610±40	1610±60	1280 ± 50	1280 ± 50	1280±70
11	990±40	990±40	990±60	620±40	620 ± 60	620±70
12	1540 ± 40	1540 ± 40	1540 ± 60	930±40	930±40	930±60
			15. J005419.99+0	02727.9		
		C IV			Si IV	
	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >
1	2730 ± 50	2730±30	2730±60	2020 ± 50	2020 ± 50	2020±70
2	1960 ± 40	1960 ± 50	1960±60	1510±30	1510 ± 40	1510 ± 50
3	2050 ± 50	2050 ± 40	2050 ± 60	1510 ± 50	1510 ± 30	1510±60
4	1430±60	1430±50	1430±80	1080±40	1080±40	1080±60
5	900±40	900±60	900±70	590±50	590±50	590±70
6	710±30	710±40	710±50	480±60	480 ± 50	480±80
7	620±40	620±30	620 ± 50	430±40	430±60	430±70
8	670±50	670±40	670±60	460±30	460±40	460±50

9	1310 ± 40	1310 ± 50	1310 ± 60	1030 ± 40	1030 ± 50	1030 ± 60
10	1020 ± 30	1020 ± 40	1020 ± 50	1000 ± 50	1000 ± 60	1000±80
11	1680 ± 40	1680±30	1680 ± 50	1330±40	1330 ± 40	1330±60
12	2370 ± 50	2370±40	2370±60	1590±30	1590±30	1590±40
13	2000 ± 50	2000 ± 50	2000 ± 70	1340 ± 40	1340 ± 40	1340±60
			16. J062012.88+8	33206.9		
		C IV			Si IV	
	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >
1	1040 ± 30	1040 ± 40	1040 ± 50	850±40	850 <u>±</u> 40	850±60
2	530±40	530 ± 50	530 ± 60	480±30	480 <u>±</u> 60	480±70
3	570 <u>±</u> 50	570±60	570 ± 80	460±40	460 <u>±</u> 40	460±60
4	640 ± 40	640 ± 40	640 ± 60	380 ± 50	380±30	380±60
5	610±40	610±30	610 ± 50	380±30	380±40	380±50
6	570 ± 50	570 ± 40	570 ± 60	380±40	380 ± 50	380±60
7	690 <u>±</u> 30	690 ± 50	690±60	480±50	480 ± 50	480±70
8	430±50	430±30	430±60	400±40	400 ± 40	400±60
9	1060 ± 40	1060 ± 40	1060 ± 60	690±50	690±40	690±60
10	1590 ± 40	1590±50	1590 ± 60	1160±50	1160±40	1160±60
11	1220 ± 50	1220 ± 40	1220 <u>±</u> 60	900±40	900 ± 50	900±60
12	1590 ± 60	1590 ± 50	1590 ± 80	1160 ± 50	1160 ± 60	1160±80
13	850±40	850 ± 50	850±60	640±60	640±40	640±70
14	900±30	900±40	900±50	720±40	720 ± 50	720±60
15	900±40	900±50	900±60	690±30	690±40	690±50
16	900±50	900±60	900±80	540 <u>±</u> 40	540 ± 50	540 ± 60
			17. J223841.89+1	42154.9		
		C IV			Si IV	
	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >
1	860±60	860±50	860 ± 80	750±40	750±40	750±60
2	1360 ± 40	1360±30	1360 ± 50	850 ± 50	850±30	850 ± 60
3	1200 ± 30	1200±50	1200 ± 60	1100 ± 60	1100 ± 40	1100 <u>+</u> 70
4	1410±40	1410 ± 40	1410 ± 60	1000 ± 30	1000 ± 50	1000 ± 60

5	1700 ± 50	1700 ± 50	1700 ± 70	1230±40	1230 ± 50	1230±60	
6	2050 ± 40	2050 ± 60	2050 ± 70	1510±40	1510±40	1510±60	
7	2050 ± 60	2050 ± 40	2050±70	1460±50	1460±40	1460±60	
8	2050±70	2050 ± 30	2050 ± 80	1410±60	1410±40	1410±70	
			18. J022844.09+0	00217.0	·		
		C IV			Si IV		
	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >	
1	900±50	900±40	900±60	640±40	640±40	640±60	
2	1410 ± 40	1410 ± 50	1410 ± 60	1050 ± 30	1050 ± 50	1050±60	
3	1730±50	1730 ± 40	1730 ± 60	1310±40	1310 ± 60	1310±70	
4	1130±60	1130 ± 30	1130±70	870±50	870±40	870±60	
5	1500 ± 40	1500 ± 40	1500 ± 60	1130±40	1130±30	1130±50	
6	1500 ± 30	1500 ± 50	1500 ± 60	1080 ± 50	1080 ± 40	1080±60	
7	1540 ± 40	1540 ± 50	1540 ± 60	1210±60	1210±50	1210±80	
8	900±50	900±60	900±80	690±40	690±30	690±50	
9	530±30	530 ± 40	530±50	430±30	430±40	430±50	
			19. J141546.24+1	12943.4	·		
		C IV		Si IV			
	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	<fwhm></fwhm>	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	<fwhm></fwhm>	
1	1340 ± 50	1340 ± 60	1340 ± 80	900±50	900±40	900±60	
2	970±40	970±40	970±60	690±40	720±50	705±60	
3	1100±50	1080 ± 50	1090±70	740±40	740±50	740±60	
4	810±50	810±30	810±60	610±50	610±40	610±60	
5	900±40	900±40	900±60	620±60	610±50	615±80	
6	570±50	570 ± 50	570±70	390±40	390±60	390±70	
7	880±60	880 ± 40	880±70	600±30	600±40	600±50	
8	900±40	900±50	900±60	580 ± 40	580±30	580±50	
9	1450±30	1450±50	1450 ± 60	1000±50	1000±30	1000±60	
10	1500±40	1500±40	1500 ± 60	1080±40	1080±40	1080±60	
11	1980±50	1980±50	1980±70	1340±60	1340±50	1340±80	
	20. J135559.03-002413.6						

		C IV		Si IV		
	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >	FWHM _{blue}	FWHM _{red}	< FWHM >
1	460±40	460±60	460±70	360±40	360 ± 50	360 ± 60
2	550 ± 50	550 ± 40	550 ± 60	360±30	360±30	360±40
3	550 ± 40	550 ± 30	550 ± 50	380±40	380±50	380±60
4	530 ± 50	530 ± 40	530 ± 60	380 ± 50	380 ± 40	380 ± 60
5	570±40	570 ± 50	570 ± 60	410±40	330±50	370±60
6	620 ± 50	620 ± 50	620 ± 70	480±40	480±60	480 ± 70
7	460±60	460±40	460 ± 70	360 ± 50	330±40	345 ± 60
8	570±40	570±40	570 ± 60	460±30	460±30	460±40
9	570±30	570 ± 40	570 ± 50	430±30	430±40	430±50
10	600±40	600 ± 50	600±60	430±40	430±50	430±60

Πίνακας 6.8. Οπτικά βάθη, στο κέντρο της γραμμής απορρόφησης (τ₀), για τις μπλε και κόκκινες συνιστώσες του C IV και του Si IV. Για κάθε BALQSO δίνονται: στην 1^η στήλη ο αύξον αριθμός των συνιστωσών στις οποίες έχουν αναλυθεί οι BALs των Si IV και C IV. Στις στήλες 2-3 δίνονται τα οπτικά βάθη των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του C IV, στις στήλες 4-5 δίνονται τα οπτικά βάθη των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του C IV, στις στήλες 4-5 δίνονται τα οπτικά βάθη των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του C IV, στις στήλες 4-5 δίνονται τα οπτικά βάθη των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του C IV, στις στήλες 4-5 δίνονται τα οπτικά βάθη των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του C IV, στις στήλες 4-5 δίνονται τα οπτικά βάθη των μπλε και κόκκινων συνιστωσών συνιστωσών απορρόφησης του Si IV.

	11. J151601.51+430931.4								
	C	IV	Si	IV					
	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)					
1	4.00 ± 0.03	2.00 ± 0.07	1.20 ± 0.03	0.85 ± 0.07					
2	0.08 ± 0.03	0.06 ± 0.03	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01					
3	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.10 ± 0.02	0.10 ± 0.02					
4	0.54 ± 0.09	0.27 ± 0.04	0.14 ± 0.09	0.07 ± 0.04					
5	0.22 ± 0.07	0.22 ± 0.05	0.53 ± 0.07	0.53 ± 0.05					
6	0.33 ± 0.08	0.32 ± 0.05	0.74 ± 0.08	0.73 ± 0.05					
7	0.41 ± 0.02	0.32 ± 0.07	0.64 ± 0.02	0.50 ± 0.07					
8	0.22 ± 0.02	0.15 ± 0.06	0.46 ± 0.02	0.32 ± 0.06					
9	0.55 ± 0.04	0.28 ± 0.07	0.32 ± 0.04	0.16 ± 0.07					

10	0.40 ± 0.04	0.21 ± 0.06	0.19±0.04	0.10 ± 0.06
11	0.22 ± 0.02	0.20 ± 0.05	0.10 ± 0.02	0.09 ± 0.05
12	0.34 ± 0.01	0.27 ± 0.07	0.15 ± 0.01	0.12 ± 0.07
13	0.17 ± 0.06	0.11 ± 0.08	0.21±0.06	0.14 ± 0.08
14	0.71 ± 0.07	0.50 ± 0.08	0.46 ± 0.07	0.32 ± 0.08
15	0.38 ± 0.06	0.22 ± 0.08	0.09±0.06	0.05 ± 0.08
16	0.48 ± 0.05	0.37 ± 0.07	0.18 ± 0.05	0.14 ± 0.07
		12.J023908.98-0	02121.3	
	C	IV	Si	IV
	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)
1	0.36 ± 0.08	0.18 ± 0.06	0.20 ± 0.08	0.15 ± 0.06
2	0.42 ± 0.03	0.27 ± 0.08	0.16±0.03	0.10 ± 0.08
3	0.33 ± 0.03	0.22 ± 0.07	0.23±0.03	0.22 ± 0.07
4	0.52 ± 0.06	0.43 ± 0.01	0.29 ± 0.06	0.28 ± 0.01
5	0.32 ± 0.05	0.16 ± 0.01	0.30 ± 0.05	0.18 ± 0.01
6	0.23 ± 0.03	0.18 ± 0.02	0.13±0.03	0.13 ± 0.02
7	0.26 ± 0.04	0.15 ± 0.09	0.10 ± 0.04	0.07 ± 0.09
8	0.12 ± 0.05	0.12 ± 0.07	0.10 ± 0.05	$0.10 {\pm} 0.07$
9	0.09 ± 0.05	0.06 ± 0.03	0.05 ± 0.02	0.05 ± 0.03
		13. J015921.53+1	41043.1	
	C	IV	Si	IV
	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)
1	$0.19 {\pm} 0.07$	$0.17 {\pm} 0.02$	0.20 ± 0.07	0.12 ± 0.02
2	0.20 ± 0.06	0.18 ± 0.02	0.34 ± 0.06	0.31 ± 0.02
3	$0.16 {\pm} 0.07$	$0.11 {\pm} 0.04$	0.33 ± 0.07	0.32 ± 0.04
4	0.29 ± 0.06	$0.16 {\pm} 0.04$	0.59 ± 0.06	$0.57 {\pm} 0.04$
5	0.36±0.05	0.31±0.02	0.17±0.05	0.17±0.02
6	0.44 ± 0.04	0.44 ± 0.01	0.23±0.04	0.12 ± 0.01
7	0.43±0.08	0.29±0.06	0.20±0.08	0.15±0.06
8	0.29±0.08	0.28±0.07	0.49±0.08	0.48±0.07
9	0.48±0.08	0.30±0.06	0.31±0.08	0.23±0.06

10	0.37 ± 0.07	0.30 ± 0.05	0.48 ± 0.07	0.24 ± 0.05
11	0.36±0.05	0.31±0.07	0.34±0.05	0.18±0.07
12	0.29 ± 0.04	0.23±0.08	0.24 ± 0.04	0.18 ± 0.08
13	0.38±0.06	0.35 ± 0.08	0.27 ± 0.06	0.14 ± 0.08
14	0.28±0.05	0.27 ± 0.08	0.23 ± 0.05	0.13±0.08
15	0.32±0.05	0.23±0.03	0.15 ± 0.05	0.11±0.03
16	0.34 ± 0.03	0.27 ± 0.02	0.25 ± 0.03	0.13 ± 0.02
17	0.14 ± 0.01	0.14 ± 0.09	0.12 ± 0.01	0.09 ± 0.04
18	0.24 ± 0.03	0.14 ± 0.07	0.12 ± 0.03	0.09 ± 0.04
19	0.15 ± 0.04	0.14 ± 0.08	0.09 ± 0.04	0.06 ± 0.03
		14. J004527.68+1	43816.1	
	C	IV	Si	IV
	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)
1	0.04 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.12 ± 0.05	0.08 ± 0.04
2	0.09 ± 0.05	0.07 ± 0.06	0.26 ± 0.05	0.14 ± 0.06
3	$0.19 {\pm} 0.07$	0.10 ± 0.05	0.20 ± 0.07	0.20 ± 0.05
4	0.36 ± 0.06	0.18 ± 0.07	0.07 ± 0.03	0.07 ± 0.03
5	0.31 ± 0.07	0.27 ± 0.03	0.06 ± 0.03	0.03 ± 0.02
6	0.18 ± 0.06	0.13 ± 0.02	0.08 ± 0.04	0.06 ± 0.02
7	0.30 ± 0.05	0.29 ± 0.08	0.21 ± 0.05	0.19 ± 0.08
8	0.22 ± 0.07	0.22 ± 0.05	0.22 ± 0.07	0.22 ± 0.05
9	0.63 ± 0.08	0.32 ± 0.05	0.28 ± 0.08	0.14 ± 0.05
10	0.56 ± 0.02	0.56 ± 0.04	0.99 ± 0.02	0.61 ± 0.04
11	0.27 ± 0.04	0.19 ± 0.06	0.65 ± 0.04	0.33 ± 0.06
12	0.61 ± 0.05	0.38 ± 0.08	0.30 ± 0.05	0.20 ± 0.08
		15. J005419.99+0	02727.9	
	С	IV	Si	IV
	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)
1	0.04±0.02	0.03±0.01	0.06±0.03	0.03±0.01
2	0.05±0.02	0.04±0.02	0.05±0.02	0.03±0.01
3	0.05±0.02	0.04±0.02	0.11±0.06	0.09±0.04

4	0.14 ± 0.05	0.10 ± 0.06	0.06 ± 0.02	0.04 ± 0.02
5	0.11 ± 0.07	0.11 ± 0.05	0.22 ± 0.07	0.11 ± 0.05
6	0.16 ± 0.08	0.13±0.07	0.25 ± 0.08	0.13 ± 0.07
7	0.05 ± 0.03	0.04 ± 0.02	0.12 ± 0.08	0.12 ± 0.03
8	0.11 ± 0.08	0.07 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02
9	0.11 ± 0.07	0.10 ± 0.08	0.07 ± 0.02	0.04 ± 0.01
10	0.10 ± 0.05	0.05 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02
11	0.10 ± 0.04	0.06 ± 0.02	0.10 ± 0.04	0.05 ± 0.03
12	0.19 ± 0.06	0.12 ± 0.04	0.09 ± 0.04	0.07 ± 0.04
13	0.09 ± 0.03	0.09 ± 0.04	0.05 ± 0.02	0.03 ± 0.01
		16. J062012.88+8	33206.9	
	C	IV	Si	IV
	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)
1	0.11 ± 0.04	0.11 ± 0.05	0.08 ± 0.02	0.08 ± 0.03
2	0.75 ± 0.05	0.61 ± 0.04	0.08 ± 0.02	0.07 ± 0.03
3	0.68 ± 0.09	0.34 ± 0.04	0.13 ± 0.09	0.07 ± 0.03
4	0.47 ± 0.07	0.27 ± 0.05	0.04 ± 0.02	0.03 ± 0.02
5	0.58 ± 0.08	0.56 ± 0.03	0.07 ± 0.02	0.04 ± 0.02
6	0.53 ± 0.02	0.49 ± 0.01	0.12 ± 0.02	0.08 ± 0.03
7	0.16 ± 0.02	0.12 ± 0.06	0.11 ± 0.02	0.06 ± 0.03
8	0.19 ± 0.04	0.14 ± 0.07	0.08 ± 0.04	0.07±0.03
9	0.32 ± 0.04	0.16 ± 0.06	0.06 ± 0.04	0.06 ± 0.03
10	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.02
11	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.02
12	0.30 ± 0.06	0.30 ± 0.08	0.10 ± 0.06	0.06 ± 0.03
13	0.10 ± 0.07	0.05 ± 0.02	0.06 ± 0.03	0.04 ± 0.02
14	0.18 ± 0.06	0.09±0.03	0.08±0.03	0.08 ± 0.03
15	0.19±0.05	0.16±0.05	0.04±0.02	0.02±0.01
16	0.16±0.07	0.14±0.05	0.04±0.01	0.03±0.01
		17. J223841.89+1	42154.9	
	С	IV	Si	IV

	τ_0 (blue)	$\tau_0 \text{ (red)}$	τ_0 (blue)	$\tau_0 \text{ (red)}$
1	2.60±0.02	2.60±0.01	0.50±0.02	0.42±0.02
2	1.20±0.09	0.77 ± 0.01	0.57±0.09	0.57 ± 0.02
3	0.67±0.07	0.63 ± 0.02	0.36 ± 0.07	0.20 ± 0.04
4	0.42 ± 0.08	0.26 ± 0.09	1.05 ± 0.08	0.62 ± 0.04
5	0.59±0.07	0.38 ± 0.07	0.64 ± 0.07	0.63 ± 0.02
6	0.52 ± 0.06	0.36 ± 0.08	0.15 ± 0.06	0.12 ± 0.01
7	0.10 ± 0.05	0.09 ± 0.02	0.14 ± 0.05	0.11 ± 0.06
8	0.08 ± 0.03	0.04 ± 0.02	0.11 ± 0.07	0.07 ± 0.07
		18. J022844.09+0	000217.0	
	C	IV	Si	IV
	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)
1	0.06 ± 0.03	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.02	0.03 ± 0.01
2	0.11 ± 0.02	0.11 ± 0.04	0.18 ± 0.04	0.09 ± 0.04
3	0.42 ± 0.08	0.34 ± 0.02	0.19 ± 0.08	0.15 ± 0.02
4	0.18 ± 0.05	0.09±0.03	0.36 ± 0.05	0.28 ± 0.01
5	0.27 ± 0.05	0.23 ± 0.06	0.43 ± 0.05	0.42 ± 0.06
6	0.37±0.04	0.23 ± 0.07	0.28 ± 0.04	0.19 ± 0.07
7	0.19 ± 0.06	0.17 ± 0.06	0.28 ± 0.06	0.22 ± 0.06
8	0.16 ± 0.08	0.09 ± 0.05	0.08 ± 0.04	0.07 ± 0.03
9	0.17 ± 0.07	0.09 ± 0.04	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01
		19. J141546.24+1	12943.4	
	C	IV	Si	IV
	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)
1	0.53 ± 0.07	0.52 ± 0.08	0.21 ± 0.07	0.19 ± 0.08
2	0.69 ± 0.08	0.46 ± 0.08	0.39 ± 0.08	0.33 ± 0.08
3	0.69 ± 0.07	0.68 ± 0.03	0.29 ± 0.07	0.15 ± 0.03
4	0.19±0.06	0.14 ± 0.02	0.85±0.06	0.69 ± 0.02
5	0.54 ± 0.05	0.46 ± 0.09	1.06 ± 0.05	0.53±0.09
6	0.43±0.07	0.22 ± 0.08	0.62±0.07	0.56 ± 0.07
7	0.33±0.03	0.32 ± 0.07	0.46 ± 0.03	0.41 ± 0.08

8	0.38 ± 0.02	0.27 ± 0.09	0.17 ± 0.02	0.16 ± 0.07
9	0.34 ± 0.08	0.29 ± 0.07	0.19 ± 0.08	0.10 ± 0.06
10	0.28 ± 0.05	0.28 ± 0.08	0.10 ± 0.05	0.09 ± 0.05
11	0.14 ± 0.05	0.13 ± 0.07	0.12 ± 0.05	0.08 ± 0.07
		20. J135559.03-0	02413.6	
	C	IV	Si	IV
	τ_0 (blue)	τ_0 (red)	τ_0 (blue)	τ_0 (red)
1	0.58 ± 0.04	0.58 ± 0.06	0.19 ± 0.04	0.11 ± 0.03
2	0.15 ± 0.06	0.10 ± 0.05	0.19 ± 0.06	0.15 ± 0.02
3	0.57 ± 0.08	0.53 ± 0.07	0.26 ± 0.08	0.18 ± 0.08
4	0.15 ± 0.06	0.13 ± 0.03	0.26 ± 0.06	0.26 ± 0.05
5	0.31 ± 0.05	0.21 ± 0.02	0.24 ± 0.05	0.13 ± 0.05
6	0.36 ± 0.04	0.26 ± 0.08	0.32 ± 0.04	0.25 ± 0.04
7	0.39 ± 0.04	0.31 ± 0.05	0.20 ± 0.04	0.13 ± 0.06
8	0.29 ± 0.05	0.20 ± 0.05	0.19 ± 0.05	0.14 ± 0.08
9	0.15 ± 0.03	0.13 ± 0.04	0.19 ± 0.03	$0.14 {\pm} 0.07$
10	0.20 ± 0.06	0.14 ± 0.06	0.12 ± 0.06	0.10 ± 0.09

Πίνακας 6.9. Ισοδύναμα εύρη (EW σε Å), για τις μπλε και κόκκινες συνιστώσες του C IV και του Si IV. Για κάθε BALQSO δίνονται: στην 1η στήλη ο αύξον αριθμός των συνιστωσών στις οποίες έχουν αναλυθεί οι BALs των Si IV και C IV, στις στήλες 2-3 δίνονται τα ισοδύναμα εύρη των μπλε, των κόκκινων συνιστωσών τουC IV, στις στήλες 4-5 δίνονται τα ισοδύναμα εύρη των μπλε και κόκκινων συνιστωσών του Si IV.

		11. J151601.51+	430931.4	
	C IV		Si IV	
	EW _{blue}	EW _{red}	EW _{blue}	EW _{red}
1	2.24 ± 0.11	1.81 ± 0.13	1.30 ± 0.07	1.02 ± 0.13
2	0.25 ± 0.12	0.19 ± 0.14	0.05 ± 0.12	0.03 ± 0.08
3	0.15 ± 0.09	0.15 ± 0.12	0.28 ± 0.08	0.28 ± 0.08
4	1.69 ± 0.09	0.93 ± 0.11	0.32±0.13	0.16 ± 0.09
5	0.84 ± 0.10	0.84 ± 0.07	1.33±0.10	1.33 ± 0.12

6	1.53±0.08	1.51 ± 0.08	1.82±0.13	1.80 ± 0.10
7	1.88±0.11	1.51 ± 0.12	1.49±0.10	1.22 ± 0.12
8	0.78 ± 0.05	0.55 ± 0.05	1.13±0.07	0.83±0.06
9	1.60 ± 0.08	0.88 ± 0.08	0.65±0.07	0.34 ± 0.05
10	1.40 ± 0.07	0.78 ± 0.02	0.45 ± 0.11	0.24 ± 0.04
11	0.82 ± 0.14	0.75 ± 0.02	0.24 ± 0.13	0.22 ± 0.06
12	1.69 ± 0.10	1.39 ± 0.07	0.54 ± 0.13	0.43 ± 0.11
13	0.55 ± 0.13	0.37 ± 0.12	0.46 ± 0.08	0.32 ± 0.12
14	1.62 ± 0.14	1.21 ± 0.08	0.84 ± 0.08	0.61 ± 0.09
15	1.08 ± 0.12	0.65 ± 0.13	0.14 ± 0.09	0.08 ± 0.09
16	2.15±0.11	1.73 ± 0.10	0.38±0.12	0.30 ± 0.10
		12.J023908.98-0	02121.3	
	C	IV	Si	IV
	EW _{blue}	EW _{red}	EW _{blue}	EW _{red}
1	2.95±0.12	1.57 ± 0.07	1.17 ± 0.06	0.89 ± 0.05
2	2.92 ± 0.05	1.97 ± 0.07	0.83 ± 0.05	0.53 ± 0.05
3	2.29 ± 0.12	1.58 ± 0.11	1.17 ± 0.04	1.12 ± 0.07
4	3.61±0.02	3.07±0.13	1.51±0.14	1.47 ± 0.14
5	1.51 ± 0.02	0.80 ± 0.13	1.05 ± 0.11	0.66 ± 0.10
6	1.36 ± 0.07	1.08 ± 0.08	0.50 ± 0.12	0.50 ± 0.13
7	3.31±0.12	1.98 ± 0.08	0.76±0.09	0.54 ± 0.14
8	1.24 ± 0.08	1.24 ± 0.09	0.57 ± 0.09	0.63 ± 0.12
9	1.21 ± 0.13	0.82 ± 0.12	0.27 ± 0.10	0.27 ± 0.11
		13. J015921.53+1	41043.1	
	C	IV	Si	IV
	EW _{blue}	EW _{red}	EW _{blue}	EW _{red}
1	1.25 ± 0.10	1.12 ± 0.10	1.03 ± 0.08	0.63 ± 0.07
2	1.26 ± 0.13	1.14 ± 0.12	1.21±0.11	1.12 ± 0.08
3	0.57 ± 0.10	0.40 ± 0.06	0.74 ± 0.05	0.72 ± 0.12
4	2.04 ± 0.07	1.18 ± 0.05	2.55±0.12	2.48±0.05
5	1.32 ± 0.07	1.15 ± 0.04	0.36±0.07	0.38±0.07

6	1.90±0.11	1.90±0.15	0.64 ± 0.14	0.35 ± 0.02
7	2.24±0.13	1.61±0.11	0.80 ± 0.10	0.61 ± 0.02
8	1.45 ± 0.13	1.40 ± 0.12	1.61±0.13	1.59 ± 0.07
9	2.25 ± 0.08	1.49 ± 0.09	1.01 ± 0.14	0.77 ± 0.12
10	2.00 ± 0.08	1.63±0.09	2.25 ± 0.12	1.22 ± 0.10
11	1.76±0.09	1.54 ± 0.10	1.29±0.11	0.72±0.13
12	1.05 ± 0.12	0.85 ± 0.08	0.66 ± 0.07	0.51±0.14
13	1.67±0.10	1.56 ± 0.11	0.77 ± 0.08	0.42±0.12
14	0.76 ± 0.12	0.74 ± 0.05	0.48 ± 0.12	0.28±0.11
15	1.01±0.06	0.75 ± 0.10	0.34 ± 0.05	0.25 ± 0.07
16	1.52±0.05	1.23±0.07	0.72 ± 0.10	0.39±0.08
17	0.40 ± 0.04	0.40 ± 0.14	0.20 ± 0.02	0.15±0.12
18	1.11±0.10	0.67 ± 0.10	0.35 ± 0.02	0.26 ± 0.05
19	0.71±0.11	0.67±0.13	0.25 ± 0.07	0.17±0.03
		14. J004527.68+1	43816.1	
	C	IV	S	i IV
	EW _{blue}	EW _{red}	EW _{blue}	EW _{red}
1	0.49 ± 0.12	0.37 ± 0.14	0.87 ± 0.12	0.58 ± 0.02
2	0.77 ± 0.09	0.60 ± 0.12	1.46 ± 0.08	0.82 ± 0.02
3	1.34 ± 0.09	0.73 ± 0.11	0.98 ± 0.13	0.98 ± 0.07
4	1.44 ± 0.10	0.76 ± 0.07	0.20 ± 0.10	0.20 ± 0.12
5	0.98 ± 0.08	0.86 ± 0.08	0.15 ± 0.13	0.07 ± 0.08
6	0.61 ± 0.11	0.45 ± 0.12	0.19 ± 0.10	0.14 ± 0.13
7	1.36 ± 0.05	1.32 ± 0.05	0.69 ± 0.13	0.62 ± 0.10
8	0.92 ± 0.07	0.92 ± 0.06	0.61 ± 0.08	0.61 ± 0.13
9	3.84 ± 0.07	2.16 ± 0.02	1.27 ± 0.11	0.67 ± 0.10
10	4.13±0.14	4.13±0.02	4.60±0.10	3.18±0.13
11	1.36±0.10	0.98±0.07	1.64 ± 0.11	0.92±0.08
12	4.24±0.13	2.85±0.12	1.25 ± 0.08	0.87±0.11
		15,1005419,99+0	02727.9	
		101,000 0 115155 1 0		

	EW _{blue}	EW _{red}	EW _{blue}	EW _{red}
1	0.59 ± 0.11	0.45 ± 0.10	0.59 ± 0.01	0.30 ± 0.08
2	0.53 ± 0.07	0.43±0.13	0.37 ± 0.07	0.22 ± 0.06
3	0.55 ± 0.08	0.44 ± 0.10	0.80 ± 0.08	0.66 ± 0.04
4	1.05 ± 0.12	0.76±0.13	0.32 ± 0.15	0.21 ± 0.01
5	0.53 ± 0.05	0.53±0.08	0.61 ± 0.10	0.32 ± 0.07
6	0.61 ± 0.08	0.50 ± 0.11	0.57 ± 0.08	0.31 ± 0.05
7	0.14 ± 0.02	0.14 ± 0.10	0.26 ± 0.11	0.26 ± 0.02
8	0.40 ± 0.02	0.26 ± 0.11	0.09 ± 0.10	0.09 ± 0.02
9	0.77±0.07	0.70±0.08	0.35 ± 0.14	0.15±0.07
10	0.54 ± 0.12	0.22 ± 0.06	0.20 ± 0.10	0.20 ± 0.12
11	0.90 ± 0.08	0.54 ± 0.04	0.64 ± 0.05	0.33±0.08
12	2.32 ± 0.13	1.50 ± 0.01	0.69 ± 0.12	0.54 ± 0.13
13	0.96 ± 0.10	0.96 ± 0.07	0.33±0.11	0.20 ± 0.10
		16. J062012.88+8	33206.9	
	C	IV	Si	IV
	EW _{blue}	EW _{red}	EW _{blue}	EW _{red}
1	0.61 ± 0.13	0.61 ± 0.10	0.33 ± 0.08	0.33 ± 0.13
2	1.76 ± 0.08	1.50 ± 0.08	0.19 ± 0.08	0.17 ± 0.08
3	1.77 ± 0.11	0.99 ± 0.11	0.30 ± 0.15	0.15 ± 0.11
4	1.46 ± 0.10	0.89 ± 0.10	0.08 ± 0.02	0.06 ± 0.10
5	1.65 ± 0.11	1.61 ± 0.14	0.14 ± 0.10	0.08 ± 0.11
6	1.45 ± 0.08	1.35 ± 0.10	0.23 ± 0.08	0.16 ± 0.08
7	0.59 ± 0.06	0.45 ± 0.05	0.27 ± 0.06	0.15 ± 0.06
8	0.45 ± 0.04	0.33±0.12	0.17 ± 0.02	0.15 ± 0.04
9	1.74 ± 0.01	0.89±0.11	0.21 ± 0.12	0.21 ± 0.01
10	$0.17 {\pm} 0.07$	0.17 ± 0.11	0.34 ± 0.08	0.34 ± 0.11
11	0.20 ± 0.07	0.13±0.04	0.27 ± 0.00	0.27 ± 0.04
12	2.37±0.15	2.37±0.10	0.56 ± 0.03	0.34 ± 0.06
13	0.46 ± 0.10	0.23±0.08	0.19 ± 0.06	0.13 ± 0.08
14	0.85 ± 0.08	0.44 ± 0.15	0.28 ± 0.05	0.28 ± 0.15

15	0.89 ± 0.11	0.76 ± 0.02	0.14 ± 0.06	0.07 ± 0.02
16	0.76 ± 0.10	0.67 ± 0.10	0.11 ± 0.14	0.08 ± 0.10
		17. J223841.89+	142154.9	
	C	V	S	i IV
	EW _{blue}	EW _{red}	EW _{blue}	EW _{red}
1	6.08 ± 0.11	6.08 ± 0.08	1.59 ± 0.09	1.37 ± 0.08
2	6.18 ± 0.11	4.50 ± 0.00	2.01±0.02	2.01 ± 0.00
3	3.56 ± 0.04	3.39 ± 0.02	1.93±0.11	1.03 ± 0.02
4	2.83 ± 0.11	1.85 ± 0.11	3.76 ± 0.10	2.53 ± 0.14
5	4.55 ± 0.08	3.14 ± 0.05	3.18±0.11	3.14 ± 0.05
6	4.92 <u>±</u> 0.15	3.59 ± 0.06	1.07 ± 0.10	0.87 ± 0.06
7	1.09 ± 0.02	0.98 ± 0.14	0.97 ± 0.11	0.77 ± 0.14
8	0.88 ± 0.10	0.44 ± 0.06	0.74 ± 0.12	0.48 ± 0.06
		18. J022844.09+	000217.0	
	C	V	S	i IV
	EW _{blue}	EW _{red}	EW _{blue}	EW _{red}
1	0.29 ± 0.08	0.15 ± 0.13	0.13 ± 0.11	0.10 ± 0.13
2	0.82 ± 0.06	0.82 ± 0.11	0.89 ± 0.12	0.46 ± 0.11
3	3.47 ± 0.02	2.88 ± 0.10	1.16 ± 0.02	0.93 ± 0.10
4	1.11 ± 0.12	0.55 ± 0.09	1.40 ± 0.12	1.12 ± 0.09
5	2.04 ± 0.08	1.76 ± 0.02	2.10±0.08	2.05 ± 0.02
6	2.70 ± 0.00	1.76 ± 0.10	1.37±0.12	0.96 ± 0.10
7	1.52 ± 0.12	1.37 ± 0.10	1.53 ± 0.02	1.23 ± 0.10
8	0.76 ± 0.08	0.44 ± 0.11	0.27 ± 0.04	0.24 ± 0.11
9	0.48 ± 0.05	0.26 ± 0.10	0.07 ± 0.05	0.02 ± 0.10
10	0.23 ± 0.06	0.23 ± 0.11	-	-
		19. J141546.24+	112943.4	
	C	V	S	i IV
	EW _{blue}	EW _{red}	EW _{blue}	EW _{red}
1	3.28±0.14	3.23±0.12	0.88±0.14	0.80±0.12
2	2.96±0.06	2.12±0.11	1.20±0.06	1.07 ± 0.11

3	3.34±0.13	3.27±0.12	0.97±0.13	0.53±0.12
4	0.80 ± 0.11	0.60 ± 0.09	1.99±0.11	1.69±0.09
5	2.26±0.10	1.97±0.09	2.37±0.10	1.38±0.09
6	1.21±0.09	0.64 ± 0.10	1.04 ± 0.09	0.95 ± 0.10
7	1.45 ± 0.02	1.41 ± 0.08	1.20 ± 0.02	1.09 ± 0.08
8	1.67 ± 0.07	1.23±0.11	0.47 ± 0.05	0.45 ± 0.11
9	2.43±0.10	2.11±0.05	0.89 ± 0.10	0.48 ± 0.05
10	2.10±0.11	2.10±0.09	0.52±0.11	0.47±0.05
11	1.45 ± 0.10	1.35±0.07	0.77 ± 0.10	0.52±0.07
		20. J135559.03-0	02413.6	
	C	IV	Si	IV
	EW _{blue}	EW _{red}	EW _{blue}	EW _{red}
1	1.26 ± 0.11	1.26 ± 0.14	0.38 ± 0.11	0.23 ± 0.14
2	0.45 ± 0.12	0.30 ± 0.10	0.38 ± 0.12	0.30 ± 0.11
3	1.48 ± 0.07	1.39 ± 0.13	0.54+0.07	0.38+0.12
4				_
	0.43±0.04	0.37±0.14	0.54±0.04	0.54±0.07
5	$\begin{array}{r} 0.43 {\pm} 0.04 \\ 0.91 {\pm} 0.07 \end{array}$	0.37±0.14 0.64±0.12	$ 0.54 \pm 0.04 \\ 0.53 \pm 0.11 $	0.54±0.07 0.25±0.04
5 6	$\begin{array}{c} 0.43 \pm 0.04 \\ 0.91 \pm 0.07 \\ 1.12 \pm 0.05 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.37 \pm 0.14 \\ 0.64 \pm 0.12 \\ 0.83 \pm 0.11 \end{array}$	$ \begin{array}{r} 0.54 \pm 0.04 \\ 0.53 \pm 0.11 \\ 0.79 \pm 0.05 \end{array} $	$ 0.54 \pm 0.07 \\ 0.25 \pm 0.04 \\ 0.63 \pm 0.11 $
5 6 7	$\begin{array}{c} 0.43 \pm 0.04 \\ 0.91 \pm 0.07 \\ 1.12 \pm 0.05 \\ 0.90 \pm 0.05 \end{array}$	0.37±0.14 0.64±0.12 0.83±0.11 0.73±0.07	$\begin{array}{c} 0.54 \pm 0.04 \\ 0.53 \pm 0.11 \\ 0.79 \pm 0.05 \\ 0.40 \pm 0.06 \end{array}$	$ \begin{array}{r} 0.54\pm0.07\\ 0.25\pm0.04\\ 0.63\pm0.11\\ 0.25\pm0.05\\ \end{array} $
5 6 7 8	$\begin{array}{c} 0.43 \pm 0.04 \\ 0.91 \pm 0.07 \\ 1.12 \pm 0.05 \\ 0.90 \pm 0.05 \\ 0.86 \pm 0.13 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.37 \pm 0.14 \\ \hline 0.64 \pm 0.12 \\ \hline 0.83 \pm 0.11 \\ \hline 0.73 \pm 0.07 \\ \hline 0.61 \pm 0.08 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.54 \pm 0.04 \\ \hline 0.53 \pm 0.11 \\ \hline 0.79 \pm 0.05 \\ \hline 0.40 \pm 0.06 \\ \hline 0.47 \pm 0.07 \end{array}$	$ \begin{array}{r} - & - & - \\ \hline 0.54 \pm 0.07 \\ \hline 0.25 \pm 0.04 \\ \hline 0.63 \pm 0.11 \\ \hline 0.25 \pm 0.05 \\ \hline 0.35 \pm 0.07 \\ \end{array} $
5 6 7 8 9	$\begin{array}{c} 0.43 \pm 0.04 \\ 0.91 \pm 0.07 \\ \hline 1.12 \pm 0.05 \\ 0.90 \pm 0.05 \\ \hline 0.86 \pm 0.13 \\ 0.46 \pm 0.13 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.37 \pm 0.14 \\ \hline 0.64 \pm 0.12 \\ \hline 0.83 \pm 0.11 \\ \hline 0.73 \pm 0.07 \\ \hline 0.61 \pm 0.08 \\ \hline 0.40 \pm 0.12 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.54 \pm 0.04 \\ \hline 0.53 \pm 0.11 \\ \hline 0.79 \pm 0.05 \\ \hline 0.40 \pm 0.06 \\ \hline 0.47 \pm 0.07 \\ \hline 0.45 \pm 0.14 \end{array}$	$ \begin{array}{r} 0.54 \pm 0.07 \\ 0.25 \pm 0.04 \\ 0.63 \pm 0.11 \\ 0.25 \pm 0.05 \\ 0.35 \pm 0.07 \\ 0.33 \pm 0.07 \end{array} $

		1. 1114548.38	3+393746.6		
_		$N_{\sigma}(\tau_0)$	for C IV	$N_{\sigma}(\tau_0)$ for	or Si IV
Component	Velocity (km/s)	blue	red	blue	red
1	-3970	1.66	0.79	3.77	2.01
2	-4790	-0.95	-0.56	2.69	3.44
3	-5300	0.28	0.00	5.89	8.28
4	-5690	-0.25	-0.62	2.59	2.79
5	-5930	0.28	-0.35	-0.10	0.00
6	-6450	1.54	0.24	0.71	0.33
7	-6890	1.12	-0.95	1.06	0.13
8	-7670	3.12	1.54	-0.35	0.00
-		2. 1101056.69	9+355833.3		
		$N_{\sigma}(\tau_0)$	for C IV	$N_{\sigma}(\tau_0)$ for	or Si IV
Component	Velocity (km/s)	blue	red	blue	red
1	-3480	-0.71	-0.71	-0.71	-0.78
2	-3980	-0.83	-0.87	-4.53	-3.39
3	-4810	-0.16	-0.22	-4.87	-3.54
4	-5580	0.51	0.11	1.77	0.27
5	-6310	0.00	0.00	1.18	0.47
6	-7400	-1.56	1.63	0.10	1.86
7	-8310	0.86	0.34	1.06	1.41
8	-8820	-0.28	-0.71	1.41	0.00
9	-9350	0.00	-0.14	1.62	1.41
10	-10020	0.94	-0.11	2.30	2.01
11	-12450	n/a	n/a	n/a	n/a
12	-15330	n/a	n/a	n/a	n/a
	10000	3. 1114704.46	5+153243.3		
		$N_{\sigma}(\tau_0)$	for C IV	$N_{\sigma}(\tau_0)$ for	or Si IV
Component	Velocity (km/s)	blue	red	blue	red
1	-1830	-0.55	-1.34	0.00	-0.95
2	-2340	-0.35	-0.45	-0.20	-0.24
3	-2790	-0.09	0.00	0.00	0.00
4	-3550	-0.11	0.39	0.51	0.29
5	-4100	-0.32	-0.46	1.40	0.81
6	-4670	-0.62	0.38	3.18	0.00
7	-5340	-0.78	-1.42	-0.78	-0.47
8	-5780	0.78	1.10	-2.05	-0.96
9	-6150	0.24	0.14	1.54	0.83
10	-6640	0.11	-0.47	-1.49	-0.47
11	-7630	-3.02	-1.79	-2.65	0.00
12	-8400	0.53	-1.24	-2.55	-1.74
13	-9130	-1.49	0.10	0.00	-0.20
14	-9880	-0.50	-0.28	-1.49	-1.32
15	-11040	0.12	0.43	-3.39	-2.60
16	-11820	-0.43	-1.84	-1.41	-0.71
17	-12400	-0.22	0.12	-1.56	-0.74
18	-12560	-0.19	-0.10	-1.20	-0.30
19	-13150	0.00	-0.71	0.81	0.00
20	-14220	-2.94	-1.88	-0.14	-0.12

Πίνακας 6.10. Τιμές του N_σ(τ₀) για τις μπλε και κόκκινες συνιστώσες των C IV και Si IV στις ταχύτητες απομάκρυνσης στις οποίες παρατηρούνται οι συνιστώσες. Με κίτρινο χρώμα σημειώνονται οι συνιστώσες για τις οποίες ισχύει N_σ \geq 1 ενώ με πορτοκαλί χρώμα σημειώνονται οι συνιστώσες για τις οποίες ισχύει N_σ \leq -1.

21	-15580	n/a	n/a	n/a	n/a
22	-16160	-1.06	-1.58	0.00	-0.89
23	-16830	-0.62	-0.71	0.11	0.00
		4. J155335.78	3+324308.1		
Component	Valacity (lum (a)	$N_{\sigma}(\tau_0)$	for C IV	$N_{\sigma}(\tau_0)$ for	or Si IV
Component	velocity (km/s)	blue	red	blue	red
1	-2410	2.63	1.75	0.57	0.42
2	-2780	2.63	0.00	4.69	3.72
3	-3350	2.35	-0.85	1.94	0.45
4	-4250	1.51	2.53	0.71	0.66
5	-4960	1.66	3.34	1.89	1.26
6	-5920	1.51	1.94	2.09	2.40
7	-6260	4.22	2.35	3.90	2.83
8	-7740	3.54	1.21	0.40	0.24
9	-10520	0.89	0.71	0.00	0.00
		5. [003135.57	7+003421.2		
		$N_{\sigma}(\tau_0)$	for C IV	$N_{\sigma}(\tau_0)$ for	or Si IV
Component	Velocity (km/s)	blue	red	blue	red
1	-5280	1.19	0.70	0.51	0.31
2	-5920	0.28	0.42	0.65	113
3	-6330	-0.16	-0.26	0.69	0.62
	-6770	0.10	0.58	1.56	1 53
Ŧ	-0770	0.71	0.30	1.50	0.22
5	-7330	0.47	1.05	1.41	0.22
0	-8210	0.51	1.05	1.12	0.79
/	-8940	0.76	-0.62	4.09	0.74
8	-9120	-0.28	0.13	-0.43	0.58
9	-9460	1./1	0.16	1.98	0.70
10	-10340	3.54	2.19	0.00	0.00
11	-10840	-2.30	-1.41	0.86	0.45
12	-11290	2.40	1.98	-1.40	0.00
		6. J023252.80	0-001351.1		
Component	Velocity (km/s)	$N_{\sigma}(\tau_0)$	for C IV	$N_{\sigma}(\tau_0)$ for	or Si IV
	5 (, , ,	blue	red	blue	red
1	-3990	2.68	1.95	1.92	0.87
2	-4460	2.12	0.50	1.54	1.40
3	-4950	2.23	0.64	0.45	0.45
4	-5440	3.35	1.27	1.20	0.42
5	-6890	0.56	1.01	0.35	-0.31
6	-7560	2.20	1.20	0.00	0.00
7	-8160	0.70	0.97	1.87	2.80
8	-8580	2.44	1.41	1.20	0.47
9	-9930	0.89	0.92	0.62	0.36
		7. J085746.61	+513444.4		
Component	Velocity (km/s)	$N_{\sigma}(\tau_0)$	for C IV	$N_{\sigma}(\tau_0)$ for	or Si IV
component	Velocity (Kill/3)	blue	red	blue	red
1	-1720	2.22	2.73	0.78	2.00
2	-2670	1.12	1.90	-0.45	0.40
3	-3400	0.00	0.56	0.11	1.54
4	-3790	0.22	-0.10	-1.70	-2.00
5	-4170	-2.60	0.38	1.12	3.84
6	-4780	-1.41	1.16	-2.19	3.60
7	-5060	3.33	-0.30	-3.20	-1.96
8	-5210	0.00	-0.20	0.00	0.45
	• 	8. J112742.98	8+022441.8		
Component	Velocity (km/s)	$N_{\sigma}(\tau_0)$	for C IV	$N_{\sigma}(\tau_0)$ for	or Si IV

		blue	red	blue	red
1	-2300	-0.55	-0.40	0.71	0.16
2	-3210	1.24	0.16	0.77	0.00
3	-4980	1.27	1.56	1.41	0.55
4	-6210	0.13	0.18	1.57	4.11
5	-7480	-0.38	-0.23	0.00	0.00
6	-8910	-0.89	-0.62	0.00	0.00
7	-10000	0.00	0.09	-2.18	-0.35
8	-10760	0.00	0.00	-1.39	-0.94
9	-11660	0.14	0.57	0.28	-1.27
10	-12810	-2.40	-0.14	-0.28	0.14
11	-14320	-1.13	-1.70	1.71	0.00
		9. J113527.25	+385744.1		
Common on t	Valacity (law (a)	$N_{\sigma}(\tau_0)$	for C IV	$N_{\sigma}(\tau_0)$ for	or Si IV
component	velocity (km/s)	blue	red	blue	red
1	-4230	7.00	7.00	2.85	1.10
2	-6120	0.97	2.50	8.43	7.54
3	-6910	-2.97	-2.40	-1.11	-0.71
4	-7740	2.54	1.00	-2.14	-2.22
5	-8620	-6.60	-3.18	-1.27	-1.15
6	-9060	0.64	0.22	1.41	0.42
7	-9650	2.76	3.10	2.30	1.48
8	-10630	-2.36	-3.25	-0.94	-0.59
	1	10. J091307.8	3+442014.3		
Component	Valacity (km/s)	10. J091307.8 N _{σ} (τ_0)	3+442014.3 for C IV	$N_{\sigma}(\tau_0)$ for	or Si IV
Component	Velocity (km/s)	10. J091307.8 N _σ (τ ₀) blue	3+442014.3 for C IV red	$N_{\sigma}(\tau_0)$ for blue	or Si IV red
Component	Velocity (km/s) -2560	10. J091307.8 N _{σ} (τ_0) blue 2.12	3+442014.3 for C IV red 2.50	$N_{\sigma}(\tau_0)$ for blue 1.02	or Si IV red 0.42
Component 1 2	Velocity (km/s) -2560 -3150	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.83\\ N_{\sigma}(\tau_0)\\ blue\\ \hline 2.12\\ 0.65 \end{array}$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43	Ν _σ (τ ₀) fo blue <u>1.02</u> 7.92	or Si IV red 0.42 8.13
Component 1 2 3	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.83\\ N_{\sigma}(\tau_{0})\\ \hline \\ blue\\ \hline \\ 2.12\\ \hline \\ 0.65\\ \hline \\ 0.00\\ \end{array}$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11	N _σ (τ ₀) fo blue 1.02 7.92 3.82	or Si IV red 0.42 8.13 3.47
Component 1 2 3 4	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_0) \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35	$ \frac{N_{\sigma}(\tau_{0}) fc}{blue} $ 1.02 7.92 3.82 2.60	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24
Component 1 2 3 4 5	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_0) \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35	$\frac{N_{\sigma}(\tau_{0}) fc}{blue}$ 1.02 7.92 3.82 2.60 0.28	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53
Component	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_0) \\ \hline \\ blue \\ \hline \\ 2.12 \\ 0.65 \\ 0.00 \\ -0.40 \\ \hline \\ -1.50 \\ 0.50 \\ \end{array}$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35 -0.12	N _σ (τ ₀) fo blue 1.02 7.92 3.82 2.60 0.28 -0.78	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97
Component	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730 -5800	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_0) \\ \\ blue \\ \hline 2.12 \\ 0.65 \\ 0.00 \\ -0.40 \\ \hline -1.50 \\ 0.50 \\ -0.26 \\ \end{array}$	3+442014.3 for C IV 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35 -0.12 -0.42	$\frac{N_{\sigma}(\tau_{0}) \text{ fo}}{1.02}$ $\frac{1.02}{7.92}$ $\frac{3.82}{2.60}$ 0.28 -0.78 -1.05	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97 -1.09
Component	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730 -5800 -7510	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_0) \\ \\ blue \\ \hline 2.12 \\ 0.65 \\ 0.00 \\ \hline -0.40 \\ \hline -1.50 \\ 0.50 \\ \hline -0.26 \\ \hline 1.54 \end{array}$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35 -0.12 -0.42 0.98	$\frac{N_{\sigma}(\tau_{0}) \text{ for}}{1.02}$ $\frac{1.02}{7.92}$ $\frac{3.82}{2.60}$ 0.28 -0.78 -1.05 0.20	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97 -1.09 -0.16
Component	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730 -5800 -7510 -8170	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_0) \\ \\ blue \\ \hline 2.12 \\ 0.65 \\ 0.00 \\ -0.40 \\ \hline -1.50 \\ 0.50 \\ -0.26 \\ \hline 1.54 \\ 0.40 \\ \end{array}$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35 -0.12 -0.42 0.98 -0.26	$\frac{N_{\sigma}(\tau_{0}) \text{ fo}}{\text{blue}}$ $\frac{1.02}{7.92}$ $\frac{3.82}{2.60}$ 0.28 -0.78 -1.05 0.20 -0.47	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97 -1.09 -0.16 -1.20
Component	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730 -5800 -7510 -8170 -8800	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_0) \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35 -0.12 -0.42 0.98 -0.26 -0.17	$\frac{N_{\sigma}(\tau_{0}) \text{ fo}}{\text{blue}}$ $\frac{1.02}{7.92}$ $\frac{3.82}{2.60}$ 0.28 -0.78 -1.05 0.20 -0.47 0.00	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97 -1.09 -0.16 -1.20 -0.85
Component	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730 -5800 -7510 -8170 -8800 -9830	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_0) \\ \\ blue \\ \hline 2.12 \\ 0.65 \\ 0.00 \\ -0.40 \\ \hline -1.50 \\ 0.50 \\ -0.26 \\ \hline 1.54 \\ 0.40 \\ \hline -0.17 \\ 0.37 \\ \end{array}$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35 -0.12 -0.42 0.98 -0.26 -0.17 1.49	$\begin{array}{c} N_{\sigma}(\tau_{0}) \text{ fo}\\ \text{blue}\\ 1.02\\ 7.92\\ 3.82\\ 2.60\\ 0.28\\ -0.78\\ -1.05\\ 0.20\\ -0.47\\ 0.00\\ -0.53\\ \end{array}$	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97 -1.09 -0.16 -1.20 -0.85 -1.04
Component	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730 -5800 -7510 -8170 -8170 -8800 -9830 -10460	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_0) \\ \\ blue \\ 2.12 \\ 0.65 \\ 0.00 \\ -0.40 \\ -1.50 \\ 0.50 \\ -0.26 \\ 1.54 \\ 0.40 \\ -0.17 \\ 0.37 \\ 0.22 \end{array}$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35 -0.12 -0.42 0.98 -0.26 -0.17 1.49 0.60	$\begin{array}{c} N_{\sigma}(\tau_{0}) \text{ for} \\ \text{blue} \\ 1.02 \\ 7.92 \\ 3.82 \\ 2.60 \\ 0.28 \\ -0.78 \\ -1.05 \\ 0.20 \\ -0.47 \\ 0.00 \\ -0.53 \\ -0.13 \end{array}$	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97 -1.09 -0.16 -1.20 -0.85 -1.04 -0.21
Component	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730 -5800 -7510 -8170 -8800 -9830 -10460 -11140	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_0) \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.12 -0.42 0.98 -0.26 -0.17 1.49 0.60 -0.12	$\begin{array}{c} N_{\sigma}(\tau_{0}) \text{ for} \\ \text{blue} \\ \hline 1.02 \\ 7.92 \\ 3.82 \\ 2.60 \\ 0.28 \\ -0.78 \\ \hline -0.78 \\ -1.05 \\ 0.20 \\ -0.47 \\ 0.20 \\ -0.47 \\ 0.00 \\ -0.53 \\ -0.13 \\ -0.21 \\ \end{array}$	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97 -1.09 -0.16 -1.20 -0.85 -1.04 -0.21 0.14
Component	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730 -5800 -7510 -8170 -8800 -9830 -10460 -11140 -11780	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_0) \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35 -0.12 -0.42 0.98 -0.26 -0.17 1.49 0.60 -0.12 0.47	$\begin{array}{c} N_{\sigma}(\tau_{0}) \text{ for} \\ \text{blue} \\ \hline 1.02 \\ 7.92 \\ 3.82 \\ 2.60 \\ 0.28 \\ -0.78 \\ -1.05 \\ 0.20 \\ -0.47 \\ 0.00 \\ -0.53 \\ -0.13 \\ -0.21 \\ 0.12 \end{array}$	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97 -1.09 -0.16 -1.20 -0.85 -1.04 -0.21 0.14 0.16
Component	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730 -5800 -7510 -8170 -8170 -8800 -9830 -10460 -11140 -11780 -12460	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8;\\ N_{\sigma}(\tau_{0})\\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ $	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35 -0.35 -0.12 -0.42 0.98 -0.26 -0.17 1.49 0.60 -0.17 1.49 0.60 -0.12 0.47 -0.90	$\begin{array}{c} N_{\sigma}(\tau_{0}) \text{ fo}\\ \text{blue}\\ \hline 1.02\\ \hline 7.92\\ \hline 3.82\\ \hline 2.60\\ \hline 0.28\\ \hline 0.28\\ \hline 0.78\\ \hline -0.78\\ \hline 0.20\\ \hline -0.47\\ \hline 0.20\\ \hline -0.47\\ \hline 0.00\\ \hline -0.53\\ \hline -0.13\\ \hline -0.21\\ \hline 0.12\\ \hline 1.56\\ \end{array}$	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97 -1.09 -0.16 -1.20 -0.85 -1.04 -0.21 0.14 0.16 0.83
Component 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730 -5800 -7510 -8170 -8170 -8800 -9830 -10460 -11140 -11780 -12460 -13180	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_{0}) \\ \\ blue \\ \hline 2.12 \\ 0.65 \\ 0.00 \\ \hline 0.40 \\ \hline 0.50 \\ \hline 0.15 \\ \hline 0.15 \\ \hline 0.17 \\ \hline 0.37 \\ \hline 0.22 \\ \hline 0.16 \\ \hline 0.14 \\ \hline 0.14 \\ \hline 0.32 \\ \end{array}$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35 -0.35 -0.12 -0.42 0.98 -0.26 -0.17 1.49 0.60 -0.17 1.49 0.60 -0.12 0.47 -0.90 1.25	$\begin{array}{c} N_{\sigma}(\tau_{0}) \text{ for} \\ \text{blue} \\ 1.02 \\ 7.92 \\ 3.82 \\ 2.60 \\ 0.28 \\ -0.78 \\ -1.05 \\ 0.20 \\ -0.47 \\ 0.00 \\ -0.53 \\ -0.13 \\ -0.13 \\ -0.21 \\ 0.12 \\ 1.56 \\ 0.86 \\ \end{array}$	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97 -1.09 -0.16 -1.20 -0.85 -1.04 -0.21 0.14 0.16 0.83 -0.16
Component 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730 -5800 -7510 -8170 -8800 -9830 -10460 -11140 -11780 -12460 -13180 -13740	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_0) \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35 -0.12 -0.42 0.98 -0.26 -0.17 1.49 0.60 -0.12 0.60 -0.12 0.47 -0.90 1.25 0.74	$\begin{array}{c} N_{\sigma}(\tau_{0}) \text{ fo}\\ \text{blue}\\ \hline 1.02\\ \hline 7.92\\ \hline 3.82\\ \hline 2.60\\ \hline 0.28\\ \hline -0.78\\ \hline -0.20\\ \hline 0.20\\ \hline -0.47\\ \hline 0.00\\ \hline -0.53\\ \hline -0.13\\ \hline -0.21\\ \hline 0.12\\ \hline 1.56\\ \hline 0.86\\ \hline 0.62\\ \hline \end{array}$	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97 -1.09 -0.16 -1.20 -0.85 -1.04 -0.21 0.14 0.16 0.83 -0.16 -0.30
Component 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730 -5800 -7510 -8170 -8800 -9830 -10460 -11140 -11780 -12460 -13180 -13740 -14160	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_{0}) \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35 -0.12 -0.42 0.98 -0.26 -0.17 1.49 0.60 -0.12 0.47 -0.90 1.25 0.74 -0.11	$\begin{array}{c} N_{\sigma}(\tau_{0}) \text{ fo}\\ \\ \text{blue}\\ \hline 1.02\\ \hline 7.92\\ \hline 3.82\\ \hline 2.60\\ \hline 0.28\\ \hline -0.78\\ \hline -1.05\\ \hline 0.20\\ \hline -0.78\\ \hline -1.05\\ \hline 0.20\\ \hline -0.53\\ \hline -0.13\\ \hline -0.21\\ \hline 0.12\\ \hline 1.56\\ \hline 0.86\\ \hline 0.62\\ \hline -1.94\\ \end{array}$	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97 -1.09 -0.16 -1.20 -0.85 -1.04 -0.21 0.14 0.16 0.83 -0.16 -0.30 -0.78
Component	Velocity (km/s) -2560 -3150 -3440 -3930 -4210 -4730 -5800 -7510 -8170 -8800 -9830 -10460 -11140 -11780 -12460 -13180 -13740 -14160 -15310	$\begin{array}{c} 10. \ J091307.8 \\ N_{\sigma}(\tau_{0}) \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	3+442014.3 for C IV red 2.50 0.43 0.11 -0.35 -0.35 -0.12 -0.42 0.98 -0.26 -0.17 1.49 0.60 -0.12 0.47 -0.90 1.25 0.74 -0.11 -0.11 -1.01	$\begin{array}{c} N_{\sigma}(\tau_{0}) \text{ fo} \\ \text{blue} \\ 1.02 \\ 7.92 \\ 3.82 \\ 2.60 \\ 0.28 \\ -0.78 \\ -1.05 \\ 0.20 \\ -0.47 \\ 0.00 \\ -0.53 \\ -0.13 \\ -0.21 \\ 0.12 \\ 1.56 \\ 0.86 \\ 0.62 \\ -1.94 \\ -1.45 \\ \end{array}$	or Si IV red 0.42 8.13 3.47 2.24 0.53 -0.97 -1.09 -0.16 -1.20 -0.85 -1.04 -0.21 0.14 0.16 0.83 -0.16 -0.30 -0.78 -0.53

Βιβλιογραφία

Abbott, D. C., Bieging, J. H., Churchwell, E., 1984, ApJ, 280, 671

Abbott, D. C., Lucy, L. B., 1985, ApJ, 288, 679

Allen, J. T., Hewett, P. C., Maddox, N., Richards, G. T., & Belokurov, V. 2011, MNRAS, 410, 860

Antoniou A., Danezis E., Lyratzi E., Popović L. Č., Stathopoulos D., Dimitrijević M. S. 2014, AdSpR, 54, 1308

Antoniou, A., Danezis, E., Lyratzi, E., Popović, L. Č., Dimitrijević, M. S., Theodossiou, E. 2010, MSAIS, 15, 138

Antoniou, A., Danezis, E., Lyratzi, E., Stathopoulos, D., Dimitrijević, M. S. 2011a, BaltA, 20, 548

Antoniou, A., Stathopoulos, D., Danezis, E., Lyratzi, E. 2011b, BaltA, 20, 572

Arav, N., Becker, R. H., Laurent-Muehleisen, S. A., et al. 1999a, ApJ, 524, 566

Arav, N., Kaastra, J., Kriss, G. A. et al., 2005, ApJ, 620, 665

Arav, N., Korista, K. T., de Kool, M., et al., 1999b, ApJ, 516, 27

Arav, N., Korista, T. K., & de Kool, M. 2002, ApJ, 566, 699

Arav, N., Li Z.-Y., 1994, ApJ, 427, 700.

Arav, N., Li Z.-Y., Begelman, M. C., 1994, ApJ, 432, 62

Arav, N., Moe, M., Costantini, E., Korista, K. T., Benn, C., Ellison, S., 2008, ApJ, 681, 954

Ardila, D. R., Herczeg, G. J., Gregory, S. G., et al. 2013, ApJS, 207, 1

Arlinghaus S. L., PHB Practical Handbook of Curve Fitting. CRC Press, 1994

Bahcall et al. 1967, ApJ, 149, 11

Barlow T. A., & Sargent W. L. W. 1997, AJ, 113, 136

Barlow T. A., 1993, PhD thesis, Univ. California, San Diego

Barlow, T. A., Hamann, F., & Sargent, W. L. W. 1997, in ASP Conf. Ser. 128, Mass Ejection from Active Galactic Nuclei, ed. N. Arav, I. Shlosman, & R. J. Weymann (San Francisco: ASP), 13

Bates, B. and Halliwell, D.R.: 1986, MNRAS 223, 673

Becker R. H., White R. L., Gregg M. D., Brotherton M. S., Laurent-Muehleisen S. A., Arav N., 2000, ApJ, 538, 72

Bevington, Philip R. (1969), Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, New York: McGraw-Hill, p. 89

Blandford, R. D., & Payne, D. G. 1982, MNRAS, 199, 883

Bottorff, M., Ferland, G. 2000, MNRAS, 316, 103

Bottorff, M., Ferland, G. 2001, ApJ, 549, 118

Bottorff, M., Ferland, G. 2002, ApJ, 568, 581

Bottorff, M., Ferland, G., Baldwin, J., Korista, K. 2000, ApJ, 542, 644

Braun, E., Milgrom, M., 1989, ApJ, 342, 100

Capellupo D. M., Hamann F., Shields J. C., Halpern, J. P., Barlow, T. A., 2013, MNRAS, 429, 1872

Capellupo D. M., Hamann F., Shields J. C., Rodriguez Hidalgo P., Barlow T. A., 2012, MNRAS, 422, 3249

Capellupo D. M., Hamann F., Shields J. C., Rodriguez Hidalgo P., Barlow T. A., 2011, MNRAS, 413, 908

Capellupo, D. M., Hamann, F. & Barlow, T. A. 2014, MNRAS, 444, 1893

Carroll, B. and Ostlie, D. (2007). An introduction to modern astrophysics. San Francisco: Pearson Addison Wesley.

Cassinelli, J. P., Swank, J. H. 1983, ApJ, 271, 681

Castor, J. I., Abbott, D. C., Klein, R. I., 1975, ApJ, 195, 157

Chartas, G., Charlton, J., Eracleous, M., et al., 2009, NewAR, 53, 128

Chelouche D., Netzer H. 2003, MNRAS, 344, 223

Chen, W., White, R. L., 1994, in: Instability and Variability of Hot-Star Winds. Dordrecht: Springer Netherlands. Moffat, A., Fullerton, A., Owocki, S. and St-Louis, N. (1994).

Cordova, F. A., and Mason, K. O., 1982, ApJ., 260, 716

Crenshaw, D. M., Kraemer, S. B., Boggess, A., Maran, S. P., Mushotzky, R. F., & Wu, C.-C., 1999, ApJ, 516, 750

Danezis E., Antonopoulou E., Theodossiou E., Mathioudakis, M. 1992, Ap&SS, 187, 307

Danezis E., Theodossiou E., Laskarides, P. G. 1991 Ap&SS, 179, 111

Danezis, E. 1984. The Nature of Be Stars, Ph.D. Thesis, University of Athens

Danezis, E., 1986, IAU, Colloq. No 92, Physics of Be Stars, Cambridge University Press.

Danezis, E., Lyratzi, E., Antoniou, A., Popović, L. Č., & Dimitrijević, M. S. 2010, MSAIS, 15, 13

Danezis, E., Lyratzi, E., Popović, L. Č., Dimitrijević, M. S., Antoniou, A. 2009, NewAR, 53, 214

Danezis, E., Nikolaidis, D., Lyratzi, E., Popović, L. Č., Dimitrijević, M. S., Theodossiou, E., Antoniou, A. 2005, MSAIS, 7, 107

Danezis, E., Nikolaidis, D., Lyratzi, E., Popović, L. Č., Dimitrijević, M. S., Antoniou, A., Theodossiou, E., 2007, PASJ, 59, 827

Danezis, E., Nikolaidis, D., Lyratzi, V., Stathopoulou, M., Theodossiou, E., Kosionidis, A., Drakopoulos, C., Christou G. & Koutsouris, P., 2003, A&SS, 284, 1119

- de Kool, M., Korista, K. T., Arav, N. 2002, ApJ, 580, 54
- Dexter, J., Agol, E., 2011, ApJL, 727, 24
- Drew, J., and Boksenberg, A. 1984, MNRAS, 211, 813
- Drew, J., and Gidding, J. 1982, MNRAS, 201, 27
- Elvis, M. 2000, ApJ, 545, 63
- Emmering, R. T., Blandford, R. D., & Shlosman, I. 1992, ApJ, 385, 460
- Faucher-Giguere, C.-A., 2012, ASPC, 460, 240
- Feldmeier, A., Puls, J., and Pauldrach, A. 1997, A&A, 322, 878.
- Filiz Ak N., Brandt W. N., Hall P. B., et al., 2013, ApJ , 777, 168
- Filiz Ak, N., Brandt, W. N., Hall, P. B., et al. 2012, ApJ, 757, 114
- Fitzpatrick, E.L., & Massa, D.L., 1999, ApJ, 525, 1011
- Foltz, C. B., Weymann, R. J., Morris, S. L., & Turnshek, D. A. 1987, ApJ, 317, 450
- Foltz, C., Wilkes, B., Weymann, R., Turnshek, D. 1983, PASP, 95, 341
- Friend, D. B., Castor, J. I., 1983, ApJ, 272, 259
- Friend, D.B., Abbott, D.C., 1986, ApJ, 311, 701
- Fukumura K., Kazanas D., Contopoulos I., Behar E., 2010, ApJ, 723, L228
- Fukumura, K., Kazanas, D., Shrader, C., et al. 2018, ApJ, 853, 40
- Gabel J. R. et al., 2003, ApJ, 595, 120
- Gallagher, S. C., Brandt, W. N., Sambruna, R. M., Mathur, S., & Yamasaki, N. 1999, ApJ, 519, 549
- Ganguly R., Eracleous M., Charlton J. C., Churchill C. W., 1999, AJ, 117, 2594
- Ganguly, R., & Brotherton, M. S. 2008, ApJ, 672, 102
- Ganguly, R., Charlton, J. C., & Eracleous, M. 2001, ApJ, 556, L7

Gänsicke, B. T., Szkody, P., de Martino, D., et al. 2003, ApJ, 594, 443

- Gibson R. R., Brandt W. N., Schneider D. P., Gallagher S. C., 2008, ApJ, 675, 985
- Gibson, R. R., Brandt, W. N., Gallagher, S. C., Hewett, P. C., & Schneider, D. P. 2010, ApJ, 713, 220
- Gibson, R. R., et al. 2009, ApJ, 692, 758
- Giustini M., Cappi M., Vignali C., 2008, A&A, 491, 425
- Gray, D., 2008, The observation and analysis of stellar photospheres. Cambridge: Cambridge University Press
- Grier, C. J., Brandt, W. N., Hall, P. B., et al., 2016, ApJ, 824, 130
- Hall, P. B. et al. 2011, MNRAS, 411, 2653
- Hall, P. B., et al., 2013, MNRAS, 434, 222

Hall, P., Hutsemékers, D., 2004, ASPC, 311, 227

Hall, P. B., Sadavoy, S. I., Hutsemekers, D., Everett, J. E. Rafiee, A., 2007, ApJ, 665, 174

Hamann F., Barlow T. A., Junkkarinen V., Burbidge E. M., 1997a, ApJ, 478, 80

Hamann F., Kaplan K. F., Hidalgo P. R., Prochaska J. X., Herbert-Fort S., 2008, MNRAS, 391, 39

Hamann F., Sabra B., 2004, in Richards G. T., Hall P. B., eds, AGN Physics with the Sloan Digital Sky Survey Vol. 311 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, The Diverse Nature of Intrinsic Absorbers in AGNs. p. 203

Hamann F., Simon L., Hidalgo P. R., Capellupo D., 2012, in Chartas G., Hamann F., Leighly K. M., eds, ASP Conf. Ser. Vol. 460, AGN Winds in Charleston. Astron. Soc. Pac., San Francisco, p. 47

Hamann, F. 1999a, ASPC, 175, 33

Hamann, F. 1999b, astro.ph.11505

Hamann, F. W., Barlow, T. A., Chaffee, F. C., Foltz, C. B., Weymann, R. J., 2001, ApJ, 550, 142

Hamann, F., 2008, MNRAS, 391, 39

Hamann, F., Barlow, T. A., & Junkkarinen, V. T.1997b, ApJ, 478, 87

Hamann, F., Chartas, G., McGraw, S., Rodriguez Hidalgo, P., Shields, J., Capellupo, D., Charlton, J. & Eracleous, M., 2013, MNRAS, 435, 133

Hamann, F., Ferland, G., 1999, ARA&A, 37, 487

Hamann, F., Kanekar, N., Prochaska, J. X., et al. 2011, MNRAS, 410, 1957

Hamann, F.: Quasi-stellar objects: Intrinsic AGN absorption lines. Encyclopedia Astron. Astrophys. Available online at http://eaa.crcpress.com (2000)

Hamann, W-R., Feldmeier, A., Oskinova, L. M., 2008, Clumping in hot-star winds, ISBN 978-3-940793-33-1.

Harnden, F. R., et al., 1979, ApJ, 239, 65

He, Z., Wang, T., Zhou, H., et al. 2017, ApJS, 229, 22

He, Z.-C., Bian, W. -H., Ge, X., Jiang, X.-L., 2015, MNRAS, 454, 3962

He, Z.-C., Bian, W.-H., Jiang, X.-L.; Wang, Y.-F., 2014, MNRAS, 443, 2532

Henize, K.G., Wray, J.D., Parsons, S.B. and Benedict, G.F., Ultraviolet Si IV/C IV Ratios for Be Stars, Proc. IAU Symp. 70, Be and Shell Stars, ed. A. Slettebak (Dordrecht:Reidel), 191, 1976

Hewett, P. C., Foltz, C. B., 2003, AJ, 125, 1784

Higginbottom, N., Knigge, C., Long, K. S., et al., 2013, MNRAS, 436, 1390

Hindmarsh, W., 1967, Atomic spectra, Oxford: Pergamon Press.

Hundt, E. 1973, A&A, 29, 17

Junkkarinen, V. T., Burbidge, E. M., Smith, H. E., 1983, ApJ, 265, 51
Knigge, C., Scaringi, S., Goad, M. R., & Cottis, C. E. 2008, MNRAS, 368, 1426

Kobayashi, H., Ohsuga, K., Takahashi, H. R. et al. 2018, PASJ, 70, 22

Kolb, W. M. Curve Fitting for Programmable Calculators. Syntec, Incorporated, 1984

Konigl, A., & Kartje, J. F., 1994, ApJ, 434, 446

Korista, K. T., Voit, G. M., Morris, S. L., Weymann, R. J., 1993, ApJS, 88, 357

Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team (2018). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.5.3), [Online]. Available: https://physics.nist.gov/asd [2018, March 25]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD

Kriss, G. A., Green, R. F., Brotherton, M., et al., 2000, ApJ, 538, 17

Krolik, J., McKee, C.M., Tarter, C.B., 1981, ApJ, 249, 422

Lamers, H. J. G. L. M., & Cassinelli, J. P. 1999, Introduction to Stellar Winds

Lamers, H.J.G.L.M., Morton, D.C., 1976, ApJS, 32, 715.

Laor, A., Bahcall, J. N., Jannuzi, B. T., et al. 1994, 420, 110

Lin, D. N. C., Papaloizou, J. C. B., 1996, ARA&A, 34, 703

Lu, W.-J., Lin, Y.-R., 2018, MNRAS, 474, 3397

Lu, W.-J., Lin, Y.-R., Qin, Y.-P., 2018, MNRAS, 473, 106

Lucy, L. B. 1982b, ApJ, 255, 286

Lucy, L. B., 1982a, ApJ, 255, 278

Lucy, L. B., Abbott, D. C., 1993, ApJ, 405, 738

Lucy, L. B., Solomon, P. M., 1970, ApJ, 159, 879

Lucy, L. B., White, R. L. 1980, ApJ, 241, 300

Lundgren B. F., Wilhite B. C., Brunner R. J., Hall P. B., Schneider D. P., York D. G., Vanden Berk D. E., Brinkmann J., 2007, ApJ, 656, 73

Lyratzi E., Danezis E., Nikolaidis D., Popović L. Č., Dimitrijević M. S., Theodossiou E., Antoniou A. 2005, MSAIS, 7, 114

Lyratzi E., Danezis, E., Popovic, L. C., Dimitrijevic, M. S., Nikolaidis, D., Antoniou, A. 2007, PASJ, 59, 357

Lyratzi, 2005, PhD Thesis

Lyratzi, E., Danezis, E., Popović, L. Č., Antoniou, A., Dimitrijević, M. S., Stathopoulos, D., 2010a, JPhCS, 257, 2035

Lyratzi, E., Danezis, E., Popović, L. Č., Antoniou, A., Dimitrijević, M. S., Stathopoulos, D., 2011, BaltA, 20, 448

Lyratzi, E., Danezis, E., Popovic, L. C., Dimitrijevic, M. S., Antoniou, A., 2010b, ASPC, 424, 308

Lyratzi, E., Danezis, E., Popovic, L. C., Dimitrijevic, M. S., Antoniou, A. 2008, POBeo, 84, 483

Lyratzi, E., Danezis, E., Popović, L. Č., Dimitrijević, M. S., Antoniou, A., Stathopoulos, D. 2010c, MSAIS, 15, 161

Lyratzi, E., Popović, L. Č., Danezis, E.; Dimitrijević, M. S., Antoniou, A., 2009, NewAR, 53, 179

Lyratzi, E., Danezis, E., Stathopoulou, M., Theodossiou, E., Nikolaidis, D., Drakopoulos, C., Soulikias, A., 2003, POBeo, 76, 27

Marziani, P., Sulentic, J., Dultzin-Hacyan, D., et al., ApJ, 1996, 104, 37

Marziani, P., Sulentic, J. W., Negrete, C. A., et al., 2010, MNRAS, 409, 1033

Mathews, W. G., 1974, ApJ, 189, 23

Mathur, S., Elvis, M., & Singh, K. P. 1996, ApJ, 455, 9

Matthews, J. H., Knigge, C., Long, K. S., et al., 2016, MNRAS, 458, 293

McFarlane, J. J., & Cassinelli, J, P., 1989, ApJ, 347, 1090

McKee, C. F. & Tarter, C. B., 1975, ApJ, 202, 306

Milne, E.A., 1926, MNRAS, 86, 459

Mirabel, I. F., Rodríguez, L. F., 1999, ARA&A, 37, 409

Misawa, T., Eracleous, M., Charlton, J. C., & Kashikawa, N., 2007, ApJ, 660, 152

Misawa, T., Inada, N., Oguri, M., Gandhi, P., Horiuchi, T., Koyamada, S. & Okamoto, R., 2014, ApJ, 794, 20.

Misawa, T., Saez, C., Charlton, J. C., et al. 2016, ApJ, 825, 25

Moffat, A.F. J. 2008, In Clumping in Hot Star Winds W.-R. Hamann, A. Feldmeier & L.M. Oskinova, eds. Potsdam: Univ.-Verl., 2008

Moore, C. E., 1950, NBS Circular (Washington: US Government Printing Office (USGPO)

Moore, C. E., 1965, Selected tables of atomic spectra. A., Atomic energy levels, B., Multiplet Tables SI II, SI III, SI IV, Washington, D.C.: National Bureau of Standards.

Moore, C. E., 1971, Selected tables of atomic spectra. A., Atomic energy levels, B., Multiplet Tables C I, C II, CIII, C IV, C V, C VI. 2nd ed. Washington, D.C.: National Bureau of Standards.

Moscibrodzka, M., Proga, D., 2013, ApJ, 767, 156

Murray N., Chiang J., Grossman S. A., Voit G. M., 1995, ApJ, 451, 498

Murray, N., Chiang, J. 1997, ApJ, 474, 91

Mushotzky, R. F., Solomon, P. M., Strittmatter, P. A. 1972, ApJ, 174, 7

Negrete, C. A., Dultzin, D., Marziani, P. et al., 2012, ApJ, 757, 62

Negrete, C. A., Dultzin, D., Marziani, P. et al., 2014, ApJ, 794, 95

Netzer, H., 2013, The physics and evolution of active galactic nuclei. Cambridge: Cambridge University Press.

Owocki S. P., 1991, in Stellar Atmospheres: Beyond Classical Models, ed. L. Crivellari, I. Hubeny, & D. G. Hummer (Dordrecht: Kluwer), 235

Owocki S. P., Castor J. I., Rybicki G. B., 1988, ApJ, 335, 914

Paris, I. et al. 2014, A&A, 563, 54

Paris, I. et al. 2012, A&A 548, 66

Paris, I., et al. 2017, A&A, 597, 79

Pauldrach, A., PuIs, J., Kudritzki, R. P., 1986, ApJ, 86.

Pereyra N. A., 2014, ApJ, 795, 39

Peterson, B. M. 1997, An Introduction to Active Galactic Nuclei. Cambridge University Press, Cambridge

Prinja, R.K., Howarth, L. D., 1988, MNRAS, 233, 123

Prinja, R.K., Howarth, L. D., Henrichs, H.F., 1987, ApJ, 317, 389

Proga D., Kallman T. R. 2004, ApJ, 616, 688

Proga, D. 2007, ASPC, 373, 267

Proga, D., Jiang, Y.-F., Davis, S.W., Stone, J. M., Smith, D., 2014, ApJ, 780, 51

Proga, D., Stone, J. M., & Kallman, T. R. 2000, ApJ, 543, 686

Proga, D., Waters, T., 2015, ApJ, 804, 137

Puls, J., 1987, A&A, 184, 227

Rafiee, A., Hall, P. B. 2011, ApJS, 194, 42

Rauch, M., Sargent, W. L. W., Womble, D. S., Barlow, T. A., 1996, ApJ, 467, 5

Reichard, T. A., Richards, G. T., Hall, P. B., Schneider, D. P., Vanden Berk, D. E., Fan, X., York, D. G., Knapp, G. R., Brinkmann, J. 2003, AJ, 126, 2594

Robinson, J., 1996, Atomic spectroscopy, New York: Marcel Dekker.

Sako, M., Kahn, S. M., Behar, A., et al. 2001, A&A, 365, 168

Savage B. D. & Sembach K. R., 1991, ApJ, 379, 245

Scargle, J. D. 1973, ApJ, 179, 705

Scargle, J. D., Caroff, L. J., Noerdlinger, P. D., 1970, Ap.J (Letters), 161, 115

Seward, F. D., Forman, W. R., Giacconi, R., et al. 1979, ApJ, 234, 55

Seward, F. D., Forman, W. R., Giacconi, R., et al. 1979, ApJ, 234, 55

Shen, Y. et al. 2011, ApJS, 194, 45

Shlosman, I., Vitello, P., 1993, ApJ, 409, 372.

Sim, S., et al. 2010, MNRAS, 404, 1369

Slater, J., 1929, The Theory of Complex Spectra. Physical Review, 34(10), 1293

Smee, S. A., Gunn, J. E., Uomoto, A., et al. 2013, AJ, 146, 32

Sobolev, V. V., 1947, Moving envelopes of stars. Leningrad: Leningrad State University Press; (in Russian). English edition: Cambridge, MA: Harvard University Press, 1960

Sobolev, V.V., 1957, SvA, 1, 678

Stathopoulos, D., Danezis, E., Lyratzi, E., Antoniou, A., & Tzimeas, D., 2015, JApA, 36, 495.

Stathopoulos, D., Danezis, E., Lyratzi, E., Antoniou, A., Tzimeas, D., 2019, MNRAS, 486, 894

Stathopoulos, D., Lyratzi, E., Danezis, E., Antoniou, A., & Tzimeas, D., 2017, EPJD., 71, 224.

Strateva, I., et al. 2003, Carnegie Observatories Astrophysics Series, Vol. 1, Coevolution of Black Holes and Galaxies, ed. L. C. Ho (Pasadena: Carnegie Obs.)

Sulentic, J. W., Bachev, R., Marziani, P., et al., ApJ, 2007, 666, 757

Sulentic, J. W., del Olmo, A., Marziani, P., et al., 2017, A&A, 608, 122

Surdej, J., and Hutsemekers, D. 1987, Astr. Ap., 177, 42

Takeuchi, S., Ohsuga, K. & Mineshige, S., 2013, PASJ, 65, 88

Takeuchi, S., Ohsuga, K. & Mineshige, S., 2014, PASJ, 66, 48

Telfer, R. C., Zheng, W., Kriss, G. A., & Davidsen, A. F. 2002, ApJ, 565, 773

Trump, J. R. et al. 2006, ApJS, 165, 1

Turnshek D.A. (1995) The Covering Factors, Ionization Structure, and Chemical Composition of QSO Broad Absorption Line Region Gas. In: Meylan G. (eds) QSO Absorption Lines. ESO Astrophysics Symposia (European Southern Observatory). Springer, Berlin, Heidelberg

Turnshek, D. A. 1984a, AJ, 278, 87

Turnshek, D. A. 1984b, ApJ, 280, 51

Turnshek, D. A. 1988, in Blades, J., Turnshek, D. and Norman, C. (1988). QSO absorption lines. Published for the Space Telescope Science Institute [by] Cambridge University Press.

Turnshek, D. A., Foltz, C. B., Grillmair, C. J., and Weymann, R. J. 1988, ApJ., 325,651

Turnshek, D. A., Weymann, R. J., Liebert, J. W., Williams, R. E., & Strittmatter, P. A. 1980, AJ, 238, 488

Tzimeas, D., Stathopoulos, D., Danezis, E., Lyratzi, E., Antoniou, A., 2019, A&C, 26, 14

Ulrich, M., Maraschi, L., & Urry, C. M. 1997, ARA&A, 35, 445

Vanden Berk, D. E., et al. 2001, AJ, 122, 549

Verner D. A., Barthel. D., Tytler D., 1994, A&AS, 108, 287

Vilkoviskij, E. Y. & Irwin, M. J. 2001, MNRAS, 321, 4

Vivek M., Srianand R., Mahabal A., Kuriakose V. C., 2012, MNRAS, (Letters) 421, 107

Wampler E. J., Chugai N. N., Petitjean P., 1995, ApJ, 443, 586

Wampler, E. J., Bergeron, J., Petitjean, P., 1993, A&A, 273, 15

Wang, T. et al. 2015, ApJ, 814, 17

Waters, T., Proga, D., 2016, MNRAS, 460, 79

Waters, T., Proga, D., Dannen, R., & Kallman, T. 2017, MNRAS, 467, 3160

Welling, C.A., Miller, B.P., Brandt, W.N., et al., 2014, MNRAS, 440, 2474

Weyman, R, Foltz, C., 1983, Liaco, 24, 538

Weymann R. J., Morris S. L., Foltz C. B., Hewett P. C., 1991, ApJ, 373, 23

Weymann, R. J., Turnshek, D. A., Christiansen, W. A., 1985, Miller, J. S. (ed) Astrophysics of active galaxies and quasi-stellar objects. University Science Books, Mill Valley, pp 333-365

Weymann, R. J., Williams, R. E., Peterson, B. M., Turnshek, D. A. 1979, ApJ, 234, 33

Weymann, R.J., Scott, J.S., Schiano, A.V.R., and Christiansen, W. A. 1982, ApJ., 262, 497

White, R. L., Becker, R. H., 1983, ApJ, 272, 19

Wildy C., Goad M. R., Allen J. T. 2014, MNRAS, 437, 1976

Wildy, C., Goad, M. R., Allen, J. T., 2015, MNRAS, 448, 2397

Yong, S. Y., Webster, R. L., King, A.L., 2016, PASA, 33, 9

Zheng, W., Kriss, G. A., Telfer, R. C., Grimes, J. P. & Davidsen, A. F. 1997, ApJ, 475, 469