Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Φυσικής
Τομέας Αστροφυσικής, Αστρονομίας, Μηχανικής

Διπλωματική Εργασία

Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης
Αστροφυσική - Αστρονομία - Μηχανική

Μελέτη της Κινηματικής και της Διέγερσης του Μοριακού Αερίου στο Ραδιογαλαξία 4C12.50 μέσω της ALMA

Κωνσταντίνα-Μαρία Φωτοπούλου
Α.Μ.: 201639

Επιβλέποντες:
Δρ. Κ. Μ. Δασύρα, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
Αν. Καθ. Δ. Χατζηδημητρίου, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Αθήνα, 2018

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Τμήμα Φυσικής
Τομέας Αστροφυσικής, Αστρονομίας, Μηχανικής

Περίληψη

Μελέτη της Κινηματικής και της Διέγερσης του Μοριακού Αερίου στο Ραδιογαλαξία 4C12.50 μέσω της ALMA

Πραγματοποιήσαμε παρατηρήσεις των γραμμών CO(1-0) , CO(3-2) και CO(4-3) στον υπερφωτεινό, υπέρυθρο ραδιογαλαξία (ULIRG) 4C12.50 χρησιμοποιώντας τη συστοιχία ραδιοτηλεσκοπίων ALMA (Atacama Large Millimeter Array). Χρησιμοποιήσαμε τα ληφθέντα δεδομένα μαζί με αρχειακές παρατηρήσεις προκειμένου να καθορίσουμε την έκταση, τη μάζα και τη διέγερση του κινηματικά παραμορφωμένου αερίου στον 4C12.50, καθώς και να ψάξουμε για κρύους (∼25 K) μοριακούς ανέμους. Το σύστημα 4C12.50 αποτελείται από -τουλάχιστον- δύο, πλούσιους σε αέριο, γαλαξίες που συγχωνεύονται και διαθέτει διαταραγμένο μεσοαστρικό υλικό (ISM), με μία πυκνή διαμόρφωση αερίου και σκόνης γύρω από τον πυρήνα. Η παρουσία ραδιοφωνικής εκπομπής γύρω από τον πυρήνα, καθώς και η ύπαρξη μίας μεγάλης κοιλότητας ακτίνων-X στον 4C12.50, ενισχύει την ιδέα ότι ο συγκεκριμένος γαλαξίας διαθέτει ένα νέο ή επανεκκινημένο ραδιοφωνικό πίδακα, ο οποίος δύναται να παρασύρει αέριο. Τα αποτελέσματά μας αποκαλύπτουν την κινηματική του μοριακού αερίου, καθώς και διάφορες χαρακτηριστικές επιμήκεις δομές, στις οποίες η κινηματική είναι σαφώς διακεκριμένη από αυτήν του αέριου δίσκου του γαλαξία. Τα CO(1-0) δεδομένα υποδεικνύουν την παρουσία ενός μοριακού ανέμου σε εκπομπή κοντά στο κέντρο του 4C12.50, που έχει παρατηρηθεί σε απορρόφηση από προηγούμενες έρευνες. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τη μάζα του επιταχυμένου μοριακού αερίου (H_2), η οποία είναι ίση με $4.3(\pm 0.7) \times 10^8\, M_\odot$, χρησιμοποιώντας παράγοντα μετατροπής της έντασης ακτινοβολίας του CO(1-0) σε μάζα H_2 ίσο με: α=$0.8\, M_\odot/(K \cdot \mathrm{km\,s^{-1}} \cdot pc^2)$. Για σύγκριση, η μάζα του κρύου μοριακού αερίου του δίσκου είναι $9.7(\pm 0.2) \times 10^9\, M_\odot$ που σημαίνει ότι ο άνεμος συμπαρασύρει ∼4% του αερίου του δίσκου με υψηλή ταχύτητα ($> 500\,\mathrm{km\,s^{-1}}$). Από προηγούμενες παρατηρήσεις του H_2, με το διαστημικό τηλεσκόπιο Spitzer, γνωρίζουμε ότι στον 4C12.50 η συνιστώσα του θερμού (∼400 K) μοριακού αερίου του δίσκου έχει μάζα $1.4(\pm 0.2) \times 10^8\, M_\odot$, ενώ το αέριο του ανιχνευθέντος θερμού μοριακού ανέμου έχει μάζα: $5.2(\pm 1.7) \times 10^7\, M_\odot$. Η υψηλότερη τιμή του πηλίκου του επιταχυμένου αερίου H_2 στη φάση των 400K είναι μία πιθανή ένδειξη θέρμανσης (heating) στον άνεμο. Η διέγερση του CO, όπως μελετήθηκε από τα πηλίκα ροής των CO(1-0) , CO(3-2) και CO(4-3) , αποκαλύπτει την παρουσία υψηλά διεγερμένου, οπτικά ρηχού αερίου κοντά στον πυρήνα, το οποίο πιθανώς σχετίζεται με το μοριακό άνεμο. Επομένως, είναι πιθανό η εναπόθεση ενέργειας να επηρεάζει ακόμη και το κρύο μοριακό αέριο, κάτι το οποίο θα μπορούσε να οδηγήσει σε παρεμπόδιση της αστρογένεσης στις περιοχές που επηρεάζονται από τον άνεμο.

Λέξεις Κλειδιά: Μεσοαστρικό Υλικό (ISM) - Ραδιοπίδακας - Μοριακός Άνεμος - Κινηματική - Διέγερση - ULIRGs - AGN

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τη Δρ. Καλλιόπη Δασύρα για την επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, την αμέριστη υποστήριξή της κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και την ουσιαστική και πολύτιμη βοήθειά της για την καλύτερη δυνατή συνέχισή τους. Ήταν πάντα διαθέσιμη να με βοηθήσει με τις γνώσεις και την εμπειρία της, δίνοντάς μου την ευκαιρία να ανακαλύψω τον τομέα στον οποίο θα ήθελα να συνεχίσω τις σπουδές μου, την Εξωγαλαξιακή Αστροφυσική.
Επίσης, Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτρια και ακαδημαϊκό μου σύμβουλο, Καθ. Δέσποινα Χατζηδημητρίου για την καθοδήγησή της και την άμεση και ουσιαστική βοήθεια, που μου παρείχε κατά τη διάρκεια τόσο των μεταπτυχιακών όσο και των προπτυχιακών σπουδών μου, καθώς και για τις συμβουλές της και την έμπρακτη υποστήριξή της για την καλύτερη δυνατή συνέχιση των σπουδών μου. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή και Διευθυντή του Πανεπιστημιακού Αστεροσκοπείου, Καθ. Ιωάννη Δαγκλή για την αμέριστη υποστήριξή του κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διαδικασία των αιτήσεών μου σε διδακτορικά προγράμματα. Επιπλεόν, θα ήθελα να ευχαριστήσω το διδακτικό προσωπικό του Τομέα Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής του Τμήματος Φυσικής, ΕΚΠΑ και ιδιαίτερα τον Καθηγητή και Διευθυντή του Τομέα Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής, Καθ. Απόστολο Μαστιχιάδη, που με βοήθησε να γνωρίσω και να κατανοήσω περισσότερο τον πολύ ενδιαφέροντα κόσμο της Αστροφυσικής. Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Χάρη και την αδελφή μου Αθανασία-Ειρήνη για τη βοήθειά τους στις δύσκολες στιγμές που περάσαμε εντός και εκτός του Πανεπιστημίου. Τέλος, οφείλω το μεγαλύτερο ευχαριστώ στους γονείς μου, που στάθηκαν δίπλα μου με ανεξάντλητη πίστη στις δυνατότητές μου και με ανέθρεψαν στηρίζοντας τις επιλογές και τα όνειρά μου, γεμίζοντάς με αυτοπεποίθηση και αισιοδοξία για το μέλλον.

Περιεχόμενα

Περίληψη iii

Ευχαριστίες v

1 Εισαγωγή 1

2 Θεωρητικά Στοιχεία 7
- 2.1 Το Μεσοαστρικό Υλικό - ISM . . . 7
  - 2.1.1 Η Μεσοαστρική Σκόνη . . . 7
  - 2.1.2 Το Μεσοαστρικό Αέριο . . . 9
  - 2.1.3 Μοριακά Νέφη . . . 10
  - 2.1.4 Υπολογισμός της μάζας του H_2 μέσω του πηλίκου μαζών H_2/CO . . . 13
- 2.2 Βασικά Στοιχεία Ραδιοαστρονομίας . . . 14
  - 2.2.1 Γενικά . . . 14
  - 2.2.2 Βασικά Μεγέθη Κεραιών . . . 17
  - 2.2.3 Διακριτική Ικανότητα Ραδιοτηλεσκοπίου και Ραδιοσυμβολόμετρου . . . 18

3 Όργανα και Δεδομένα 21
- 3.1 Η Συστοιχία Ραδιοτηλεσκοπίων ALMA . . . 21
- 3.2 Τα Δεδομένα της ALMA . . . 22

4 Αποτελέσματα 27
- 4.1 Η Ροή Ακτινοβολίας των Γραμμών Εκπομπής . . . 27
- 4.2 Ο Δίσκος του Μοριακού Αερίου από Παρατηρήσεις στο CO . . . 31
- 4.3 Άλλες Δομές και Υποψήφιες Ανιχνεύσεις Ανέμου . . . 35
  - 4.3.1 Περιοχή Νότια του Κύριου Πυρήνα . . . 35
  - 4.3.2 Περιοχή Μεταξύ του Κύριου Πυρήνα και του Ridge . . . 40
  - 4.3.3 Πιθανή Ανίχνευση Αδιαβατικά Διαστελλόμενης Φυσαλίδας 42
  - 4.3.4 Πιθανή ανίχνευση αστρικού ανέμου . . . 44
  - 4.3.5 Πυρηνικός Άνεμος . . . 45
  - 4.3.6 Μελέτη της Διέγερσης του Αερίου . . . 48

5 Συζήτηση επί των Αποτελεσμάτων 53
  - 5.0.1 Υπολογισμός Μάζας Μοριακού Αερίου H_2 . . . 53
  - 5.0.2 Θέρμανση (Heating) Αερίου . . . 54
  - 5.0.3 Αποβολή (Ejection) Αερίου . . . 55
  - 5.0.4 Μηχανισμός Δημιουργίας Ανέμου (driver) . . . 56
  - Ραδιο-πίδακας . . . 56

Πίεση Ακτινοβολίας 57
Υπερκαινοφανείς 57
5.0.5 Συμπέρασμα 58

Βιβλιογραφία **59**

Κατάλογος σχημάτων

1.1 Μικρής κλίμακας ραδιοφωνική εκπομπή στον 4C12.50 2
1.2 Μεγάλης κλίμακας ραδιοφωνική εκπομπή στον 4C12.50 3
1.3 Εικόνες του γαλαξία 4C12.50 στο οπτικό 5

2.1 Σκοτεινό Νεφέλωμα "Coalsack" 8
2.2 Φαματοσκοπικά Διπλό Σύστημα Αστέρων 9
2.3 Δημιουργία της γραμμής των 21cm του HI 11
2.4 Μοριακό νέφος "Pillars of Creation" 12
2.5 Σχηματική απεικόνιση μέτρησης ακτινοβολίας από ανιχνευτή. . . 14
2.6 Βασικά Μέρη ενός Ραδιοτηλεσκοπίου 15
2.7 Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κεραίας 16

3.1 Συστοιχία Ραδιοτηλεσκοπίων ALMA 21

4.1 Φάσματα του δίσκου αερίου του γαλαξία 4C12.50 27
4.2 Εικόνες της εκπομπής των γραμμών του μοριακού αερίου και του συνεχούς 28
4.3 Εικόνες της εκπομπής της γραμμής του H_2O 30
4.4 Εικόνες της εκπομπής της γραμμής του HCO+(5-4) 30
4.5 Ανιχνεύσεις CO(1-0), CO(3-2) και CO(4-3)σε διάφορα εύρη ταχυτήτων εντός: -300 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως 300 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ 31
4.6 Έκταση του μοριακού αερίου με ταχύτητες κοντά στην ακτινική ταχύτητα περιστροφής του γαλαξία 32
4.7 Χάρτες ροής, ταχύτητας και διασποράς ταχύτητας (σ) 33
4.9 Ανίχνευση λαμπρής δομής νότια του κύριου/δυτικού πυρήνα σε θετικές ταχύτητες 36
4.10 Ανίχνευση λαμπρής δομής νότια του κύριου/δυτικού πυρήνα σε θετικές ταχύτητες από δεδομένα των «βαθέων» κύβων. 37
4.11 Ανίχνευση δομής νότια του κύριου/δυτικού πυρήνα σε αρνητικές ταχύτητες 38
4.12 Ανίχνευση δομών νότια του κύριου πυρήνα σε θετικές και αρνητικές ταχύτητες 39
4.13 Ανιχνεύσεις πιθανού ανέμου κατά μήκος του άξονα της μεγάλης έκτασης ραδιοεκπομπής 39
4.14 Ανιχνεύσεις CO, σε εύρος ταχύτητας: -100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως 100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής [O III] 40
4.15 Ανιχνεύσεις CO(1-0) και CO(4-3) , στην περιοχή μεταξύ κύριου πυρήνα και [O III] ridge σε υψηλές ταχύτητες 41
4.16 Συνολική εικόνα των ανιχνεύσεων στην περιοχή μεταξύ κύριου πυρήνα και [O III] ridge σε υψηλές ταχύτητες 42

4.17 Ανιχνεύσεις μοριακών νεφών CO(1-0) σε υψηλές ταχύτητες, πιθανώς μέρος της «φούσκας» 43
4.18 Πιθανή ανίχνευση της αδιαβατικά διαστελλόμενης «φούσκας» στο CO(1-0) 43
4.19 Συνολική εικόνα της πιθανής αδιαβατικά διαστελλόμενης «φούσκας» στο CO(1-0) 44
4.20 Ταχέως κινούμενες δομές νότιο-ανατολικά του δευτερεύοντος πυρήνα 45
4.21 Contours ταχέως κινούμενων δομών νότιο-ανατολικά του δευτερεύοντος πυρήνα πάνω από τις εικόνες στο οπτικό 45
4.22 Ανιχνεύσεις στον κύριο/δυτικό πυρήνα 46
4.23 Ανίχνευση ανέμου σε πολύ υψηλή ταχύτητα στον κύριο/δυτικό πυρήνα 47
4.24 Ανίχνευση ανέμου στον κύριο/δυτικό πυρήνα από τα δεδομένα του «βαθύ» κύβου δεδομένων 47
4.25 Ανίχνευση ανέμου στον κύριο/δυτικό πυρήνα από τα δεδομένα του «ρηχού» κύβου δεδομένων 48
4.26 Πηλίκα ροών για τα CO(1-0) , CO(3-2) και CO(4-3) σε εύρη ταχυτήτων του δίσκου και της νότιας ανίχνευσης 51
4.27 Πηλίκα ροών για τα CO(1-0) , CO(3-2) και CO(4-3) στις υψηλές ταχύτητες των ανιχνεύσεων μεταξύ κύριου πυρήνα και [O III] ridge 51

5.1 Νόμος δύναμης στο ραδιοφωνικό φάσμα του 4C12.50 56

Στην αδελφή μου...

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Οι μοριακοί άνεμοι είναι ενεργητικές ροές υλικού που δύνανται να επηρεάσουν σημαντικά το μεσοαστρικό υλικό (ISM) και κατ' επέκταση, να επηρεάσουν την αστρική δημιουργία και την εξέλιξη του γαλαξία στον οποίο εκδηλώνονται. Δύνανται να δημιουργηθούν κατά το σχηματισμό νέων άστρων, των εκρήξεων υπερκαινοφανών ή γεγονότων που συνδέονται με την προσαύξηση μάζας υπερμεγέθων μελανών οπών στα κέντρα γαλαξιών (AGN) (πίεση ακτινοβολίας, άνεμοι δίσκου προσαύξησης, ραδιοφωνικοί πίδακες). Τα γεγονότα που συνδέονται με την προσαύξηση μάζας στους AGN μπορούν να απελευθερώσουν ενέργεια μεγαλύτερη ακόμη και από την ενέργειας σύνδεσης των αντίστοιχων γαλαξιών, οδηγώντας σε αποβολή (ejection) ή θέρμανση (heating) του αερίου, δυσχεραίνοντας έτσι (ή ακόμη και τερματίζοντας) την αστρική δημιουργία και καταστέλλοντας την προσαύξηση μάζας στις μελανές οπές (Fabian, 2012). Πιο αναλυτικά, μέρος αυτής της ενέργειας μπορεί να επιστρέψει στο ISM μέσω ακτινοβολίας, ανέμων του δίσκου προσαύξησης και ραδιο-πιδάκων (μηχανισμοί "feedback") και κατά συνέπεια, δύναται να διεγείρει ή να παραμορφώσει κινηματικά το αέριο σε μεγάλη κλίμακα (π.χ., σε έκταση kpc^2; Rupke and Veilleux, 2011; Lípari et al., 2004). Η επίδραση αυτών των μηχανισμών στην εξέλιξη των γαλαξιών είναι εντονότερη εάν κατορθώσουν να επιταχύνουν μέρος του αερίου σε αρκούντος υψηλές ταχύτητες (μεγαλύτερες από την ταχύτητα διαφυγής του αντίστοιχου γαλαξία), με αποτέλεσμα να διαφύγει από το βαρυτικό δυναμικό. Σε αυτήν την περίπτωση, το ταχέως κινούμενο αέριο θα χαθεί στο διαγαλαξιακό υλικό (IGM) και η σχετιζόμενη με αυτό αστρική δημιουργία θα πάψει, ενώ θα καθυστερήσει και η αστρογένεση που γίνεται από το εναπομείναν στο γαλαξία αέριο.

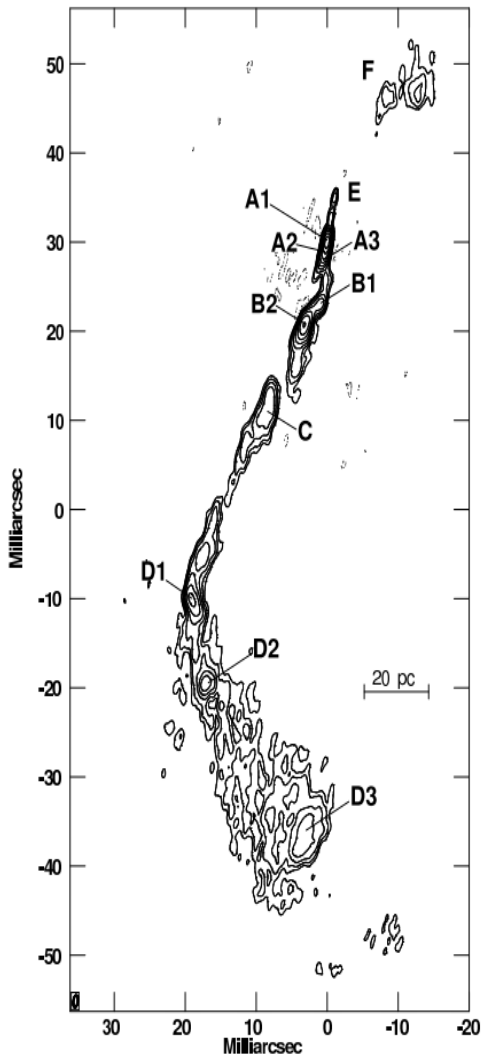
Μέσα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, συλλέξαμε κατάλληλα CO δεδομένα[1] μέσω της ALMA, με σκοπό να υπολογίσουμε τη μάζα, την έκταση και τη διέγερση του κινηματικά παραμορφωμένου αερίου στο γαλαξία 4C12.50, καθώς και να ψάξουμε για κρύους ($\sim$ 25 K) μοριακούς ανέμους. Το σύστημα 4C12.50 (PKS 1345+125, IRAS 13451+1232) αποτελείται από -τουλάχιστον- δύο γαλαξιακούς πυρήνες, οι οποίοι συγχωνεύονται μεταξύ τους[2]: έναν δυτικό[3] πυρήνα και έναν πυρήνα στα ανατολικά. Μέσα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θα αναφερόμαστε σε αυτούς τους γαλαξιακούς πυρήνες ως: «κύριος» για το δυτικό και

[1]για τα οποία θα συζητήσουμε εκτενώς στο Κεφάλαιο 3

[2]Σε ένα τέτοιο σύστημα αποδίδεται διεθνώς ο όρος "galactic merger" ή πιο απλά "merger".

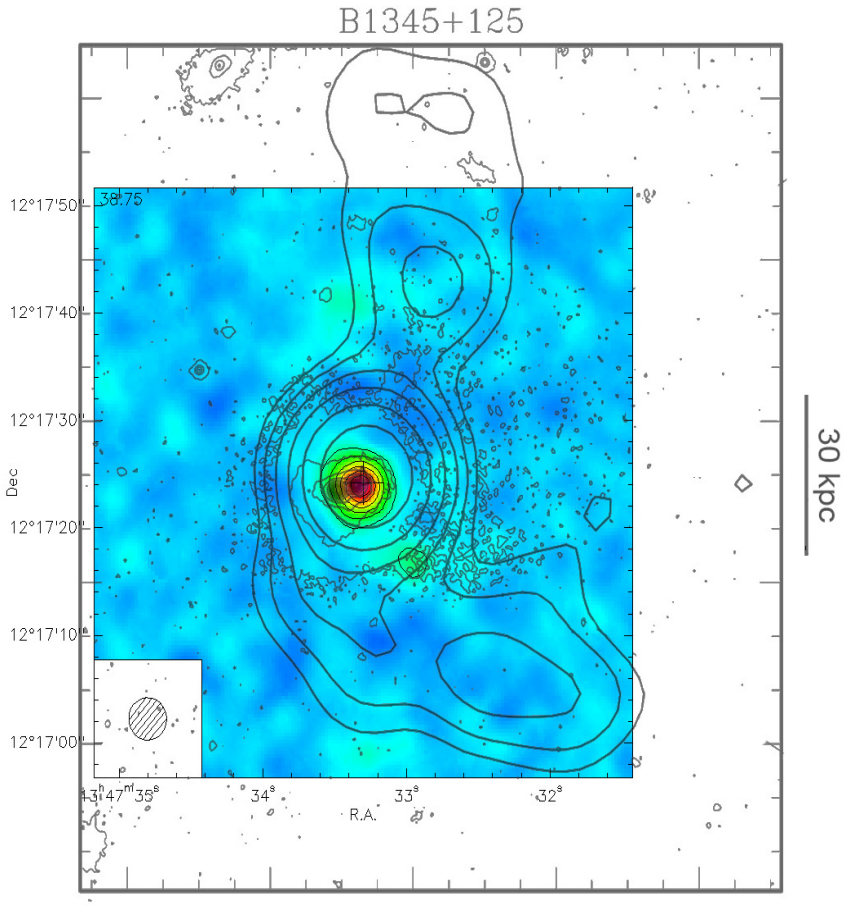
[3]Να σημειωθεί ότι σε όλες τις εικόνες που εμφανίζονται στο παρόν Κεφάλαιο και στο Κεφάλαιο 3 η Ανατολή και η Δύση είναι αντεστραμμένες, όπως συνηθίζεται στις αστρονομικές φωτογραφίες. Δηλαδή στα αριστερά βρίσκεται η Ανατολή, ενώ στα δεξιά η Δύση.

«δευτερεύων» για τον ανατολικό. Η συγχώνευση των γαλαξιών βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο, όπου οι πυρήνες πλέον διαχωρίζονται με απόσταση 4.4 kpc και περιβάλλονται από διάφορες μικρότερες δομές (Batcheldor et al., 2007). Από τον κύριο/δυτικό πυρήνα του συστήματος 4C12.50 πηγάζει ένας σχετικιστικός ραδιοφωνικός πίδακας (Stanghellini et al., 1997) με ταχύτητα τουλάχιστον 0.8c (Lister et al., 2003). Η ραδιοφωνική εκπομπή είναι περιορισμένη εντός ∼300 pc και η ηλικία του του ραδιοφωνικού πίδακα υπολογίζεται ότι είναι $<10^5$ yrs (Lister et al., 2003) υποδηλώνοντας ότι πρόκειται για μία νέα ή επανεκκινημένη ραδιοφωνική πηγή. Η ραδιο-εκπομπή του σχήματος-S πίδακα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Μικρής κλίμακας ραδιοφωνική εκπομπή στον κύριο πυρήνα του 4C12.50.
(Lister et al., 2003; Stanghellini et al., 1997)

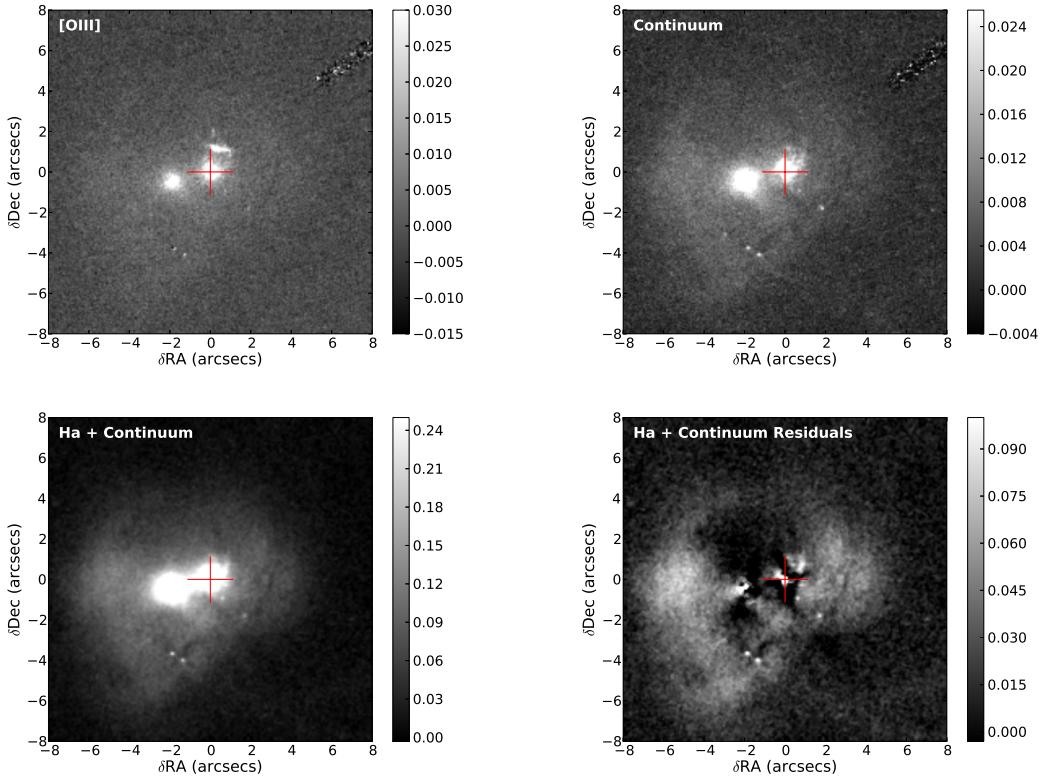
Στον 4C12.50 υπάρχει και παλαιότερη ραδιοφωνική εκπομπή, ένας ραδιο-πίδακας που εκτείνεται σε απόσταση $\sim 90kpc$ από τον κύριο πυρήνα και παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2 καθώς και μία κοιλότητα, η οποία εκπέμπει στις ακτίνες-X και η εκπομπή της έχει μέγιστο σε απόσταση $\sim 20kpc$ νότια του κύριου πυρήνα (Siemiginowska et al., 2008). Η ύπαρξη αυτών των στοιχείων και το πλούσιο σε αέριο και σκόνη ISM του γαλαξία 4C12.50, τον καθιστούν ιδανικό για μελέτες μοριακών ανέμων που επάγονται από πίδακες στο κοντινό Σύμπαν. Στο γαλαξία 4C12.50 έχει ανακαλυφθεί άνεμος σε απορρόφηση για το HI (Morganti et al., 2005) και το H_2 (Dasyra and Combes, 2012), που υποδηλώνει την ύπαρξη μοριακών νεφών, τα οποία επιταχύνονται λόγω των ραδιο-πιδάκων.



Σχήμα 1.2: Contours της μεγάλης κλίμακας ραδιοφωνικής εκπομπής στον 4C12.50 πάνω από μία εικόνα του γαλαξία στο CO(1-0) από το PdB του IRAM. Προσαρμογή από το Dasyra et al., 2014

Στα οπτικά μήκη κύματος , η εκπομπή του συνεχούς του κύριου (δυτικού) πυρήνα είναι χαμηλότερη (κατά έναν παράγοντα 1.3 εντός μιας περιοχής ακτίνας$1''$ από το κέντρο των πυρήνων) συγκριτικά με αυτήν του δευτερεύοντος (ανατολικού) πυρήνα, όπως φαίνεται στην επάνω δεξιά εικόνα του Σχήματος 1.3. Επομένως, το σύστημα προέρχεται από συγχωνευόμενους πυρήνες με παρόμιων αστρικών μαζών. Από την άλλη πλευρά, ο κύριος πυρήνας έχει σημαντικά υψηλότερη εκπομπή ιονισμένου οξυγόνου [O III] (κατά έναν παράγοντα 3 μέσα σε ακτίνα $1''$ από το κέντρο των πυρήνων) και ως εκ τούτου εμφανίζεται μεγαλύτερος απ' ότι ο δευτερεύων στην επάνω αριστερά εικόνα του Σχήματος 1.3, η οποία λήφθηκε με το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble (Hubble Space Telescope - HST). Στη συγκεκριμένη φωτογραφία αποκαλύπτεται μία περιοχή βορειοδυτικά του κύριου πυρήνα στην οποία υπάρχει μία διακριτή, επιμήκης περιοχή με νηματοειδείς δομές που εκπέμπει στο [O III] . Ίχνη της ίδιας περιοχής φαίνονται και στην εικόνα εκπομπής του συνεχούς στο Σχήμα 1.3. Σε αυτήν την περιοχή θα αναφερόμαστε με τον όρο "ridge", ελλείψει κατάλληλης απόδοσης του όρου στα ελληνικά. Και οι δύο πυρήνες έχουν εμφανείς νηματοειδείς δομές που πηγάζουν από αυτούς και εκτείνονται ακτινικά προς τα έξω, οι οποίες είναι ορατές τόσο στο [O III] όσο και στο συνεχές. Διάφορες δομές, όπως παλιρροϊκές ουρές ("tidal tails") και σπειροειδή κελύφη ("shells"), οι οποίες οφείλονται στη συγχώνευση των γαλαξιών είναι ορατές σε αποστάσεις μεγαλύτερες από $2''$ στο Σχήμα 1.3. Στο κάτω αριστερά πάνελ του Σχήματος 1.3 έχουμε συμπεριλάβει μία ακόμη φωτογραφία του 4C12.50 στο οπτικό, η οποία λήφθηκε με το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble. Συγκεκριμένα, είναι μία εικόνα εκπομπής H_α + συνεχούς, η οποία αποκαλύπει τους δύο πυρήνες σε επαφή (Batcheldor et al., 2007). Από αυτήν την εικόνα αφαιρέθηκαν, με τη χρήση του GALFIT (Peng et al., 2002), όλες οι συμμετρικές δομές του γαλαξία (δηλαδή αφαιρέθηκε ένα μοντέλο αποτελούμενο από ένα κοινό bulge[4] και δύο δίσκους που βρίσκονται στη θέση των δύο πυρήνων), με σκοπό να γίνουν καλύτερα ορατές οποιεσδήποτε δομές πιθανώς υπάρχουν, των οποίων η εκπομπή ενδεχομένως σκιάζεται από την έντονη εκπομπή των γαλαξιακών πυρήνων (Dasyra and Combes, 2011). Όλες αυτές οι οπτικές εικόνες φαίνονται στο Σχήμα 1.3.

[4]Οι σπειροειδείς γαλαξίες αποτελούνται, μεταξύ άλλων, από ένα κεντρικό «εξόγκωμα», μία συμπύκνωση αστέρων, που διεθνώς ονομάζεται "bulge". Στα ελληνικά θα μπορούσε να αποδοθεί ως «σφαιροειδές του πηρήνα», αλλά στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα προτιμήσουμε το διεθνή όρο bulge για να αναφερόμαστε στη συγκεκριμένη δομή.



Σχήμα 1.3: Εικόνες του γαλαξία 4C12.50 στο οπτικό. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3. ***Επάνω Αριστερά***: Εκπομπή [O III] . Όργανο: Κάμερα ACS του HST. Φίλρο: F550M στα 5580Å. ***Επάνω Δεξιά***: Εκπομπή Συνεχούς. Όργανο: Κάμερα ACS του HST. Φίλρο: FR459M στα 5092Å. ***Κάτω Αριστερά***: Εκπομπή H_α + Συνεχούς. Όργανο: Κάμερα ACS του HST. Φίλρο: FR647M στα 6616Å. ***Κάτω Δεξιά***: Από την εικόνα στο οπτικό της εκπομπής H_α + συνεχούς αφαιρέθηκε ένα γαλαξιακό μοντέλο αποτελούμενο από: 1 κοινό bulge και 2 δίσκους, με σκοπό να αναδειχθεί η εκπομπή τυχουσών δομών, οι οποίες δεν ήταν ορατές λόγω της έντονης ακτινοβολίας του πυρήνα. Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης φαίνεται στην εικόνα κάτω δεξιά.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικά Στοιχεία

2.1 Το Μεσοαστρικό Υλικό - ISM

Υπάρχει η κοινή αντίληψη ότι το εξώτερο διάστημα είναι ένα πλήρες κενό, χωρίς υλικό... Στην πραγματικότητα, ανάμεσα στα άστρα υπάρχει τεράστια ποσότητα ύλης[1] υπό μορφή αερίου και σκόνης, την οποία ονομάζουμε «μεσοαστρικό υλικό» (ή όπως είναι διεθνώς καθιερωμένο: "Interstellar Medium - ISM")[2]. Η παρουσία του μεσοαστρικού υλικού είναι λιγότερο εμφανής απ' ότι η παρουσία των άστρων, επειδή η μάζα που περιέχεται στα κανονικά άστρα έχει συμπυκνωθεί από την ιδιοβαρύτητα, δημιουργώντας μια πυκνή κατάσταση άμεσα παρατηρήσιμη. Αντίθετα, το μεσοαστρικό υλικό είναι εξαπλωμένο πολύ αραιά στις τεράστιες αποστάσεις των διαστρικών περιοχών, με αραίωση μεγαλύτερη από οποιοδήποτε τεχνητό κενό μπορεί να επιτευχθεί στα γήινα εργαστήρια. Στις ψυχρές, πυκνότερες περιοχές του ISM, η ύλη είναι κυρίως σε μοριακή μορφή, με αριθμητική πυκνότητα της τάξης του 10^6 μορίων ανά cm^3, ενώ στις θερμές και αραιότερες περιοχές, η ύλη είναι κατά κύριο λόγο ιονισμένη με πυκνότητες τόσο χαμηλές όσο της τάξης των 10^{-4} ιόντων ανά cm^3. Από άποψη μάζας, η ύλη μεταξύ των αστέρων αποτελείται κατά 99% από αέριο -οποιασδήποτε μορφής- και κατά περίπου 1% από σκόνη.

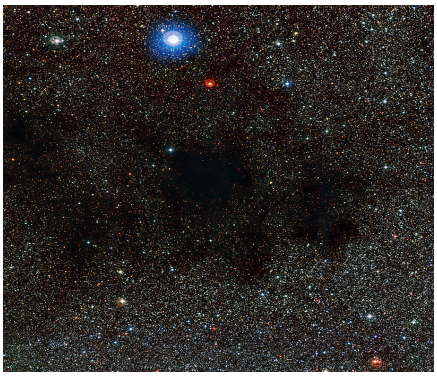
2.1.1 Η Μεσοαστρική Σκόνη

Η μεσοαστρική σκόνη αποτελείται από σωματίδια/κόκκους με ακτίνες μεταξύ $0.01mm$ και $0.3mm$. Τα σωματίδια δεν είναι σφαιρικά, αλλά επιμήκη και μάλιστα η διάταξή τους στο χώρο δεν είναι τυχαία, αλλά οι κόκκοι είναι προσανατολισμένη, έτσι ώστε ο μεγάλος ημιάξονάς τους να είναι κάθετος στο μεσοαστρικό μαγνητικό πεδίο. Παρατηρήσεις δείχνουν πως οι κόκκοι αποτελούνται από ένα βραχώδη πυρήνα που είναι καλυμμένος από ένα μανδύα, ο οποίος αποτελείται από μεθάνιο, αμμωνία, νερό ή και τα τρία μαζί. Οι κόκκοι βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, κατά μέσο όρο πάνω από $100m$, πράγμα που φανερώνει πως η μεσοαστρική σκόνη είναι εξαιρετικά αραιή. Οι πρώτες ενδείξεις για την ύπαρξη μεσοαστρικής σκόνης ήταν ουράνιες περιοχές στις οποίες παρατηρούνταν φαινομενική έλλειψη άστρων και ο William Herschel περιέγραφε ως «τρύπες στον ουρανό» (Σχήμα: 2.1). Η πρώτη ικανοποιητική απόδειξη ήρθε το 1930, με το έργο

[1]Για παράδειγμα, το μεσοαστρικό υλικό του Γαλαξία μας έχει πιθανώς μάζα πολλών δισεκατομμυρίων $M_\odot$

[2]Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα αναφερόμαστε στο μεσοαστρικό υλικό με τη διεθνή συντομογραφία ISM

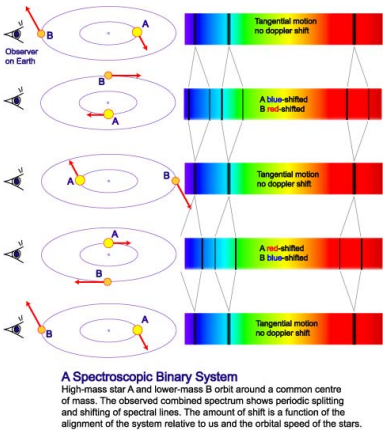
του R.J. Trumpler πάνω στα ανοιχτά σμήνη. Ο Trumpler υπέθεσε ότι η πραγματική (γραμμική) διάμετρος D ενός ανοιχτού σμήνους πρέπει να είναι ανεξάρτητη της απόστασής του από τον παρατηρητή, έστω r. Τότε η γωνιακή διάμετρος του σμήνους θα δίνεται από τον τύπο: $\vartheta = \frac{D}{r} \Rightarrow \vartheta^2 = \frac{D^2}{r^2}$ και η φαινόμενη λαμπρότητα (των αστέρων της Κύριας Ακολουθίας) του σμήνους θα είναι: $F = \frac{L^2}{4\pi r^2}$ άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι: $F \propto \vartheta^2$. Κάνοντας το διάγραμμα $F = f(\vartheta^2)$ αναμένουμε να είναι μία ευθεία γραμμή. Ωστόσο, τα παρατηρησιακά δεδομένα του Trumpler απέκλιναν από αυτή τη θεωρητική ευθεία και συγκεκριμένα όσο μακρύτερα βρισκόταν το σμήνος, τόσο μικρότερη από την αναμενόμενη ήταν η φαινόμενη λαμπρότητά του. Η ερμηνεία που δόθηκε από τον Trumpler -την οποία αποδεχόμαστε και σήμερα- ήταν ότι ανάμεσα στο σμήνος και τον παρατηρητή υπάρχει ένα μέσο που απορροφά φως και δημιουργεί όλο και εντονότερη επισκότηση κατά μήκος της διεύθυνσης του παρατηρητή καθώς αυξάνεται η απόσταση του σμήνους. Σήμερα, γνωρίζουμε ότι το μέσο αυτό είναι η μεσοαστρική σκόνη και πιστεύεται ότι η επισκότηση του αστρικού φωτός που προκαλεί οφείλεται σε έναν συνδυασμό πραγματικής απορρόφησης και σκέδασης, γνωστό με το γενικό όνομα της «εξάλειψης» του αστρικού φωτός. Άλλες επιδράσεις της μεσοαστρικής σκόνης στο αστρικό φως, εκτός από την «εξάλειψη», είναι η μεσοαστρική «ερύθρωση» (δηλαδή η προοδευτική χρώση του αστρικού φωτός από τους κόκκους της μεσοαστρικής σκόνης, καθώς το κυανό φως υφίσταται επιλεκτικά μεγαλύτερη εξάλειψη απ' ότι το ερυθρό) και η μεσοαστρική «πόλωση» (δηλαδή η επιλεκτική εξάλειψη του αστρικού φωτός με διανύσματα πόλωσης ευθυγραμμισμένα παράλληλα προς τους μεγάλους άξονες των κόκκων σκόνης).



Σχήμα 2.1: Το σκοτεινό νεφέλωμα Coalsack στο νότιο μέρος του Γαλαξία είναι ορατό διά γυμνού οφθαλμού και δίνει την εντύπωση μιας μεγάλης περιοχής στον ουρανό όπου υπάρχει αισθητή έλλειψη αστέρων. Πράγματι, η φαινόμενη «τρύπα στον ουρανό» εξηγείται από την επισκότηση του φωτός πολλών μακρινών άστρων λόγω της σκόνης του παρεμβαλλόμενου νεφελώματος, η οποία απορροφά και σκεδάζει το φως τον άστρων.Το νεφέλωμα Coalsack είναι ένα από τα σπάνια μοριακά νέφη στα οποία δεν παρατηρείται αστρογένεση ((Beuther et al., 2011)). Η εικόνα λήφθηκε με το Wide Field Imager του $2.2m$ τηλεσκοπίου MPG/ESO.
Πηγή: ESO website: http://www.eso.org/public/images/eso1539a/

2.1.2 Το Μεσοαστρικό Αέριο

Το μεσοαστρικό αεριο αποτελείται κυρίως από υδρογόνο (περίπου 70%) και ακολούθως από ήλιο (περίπου 28%), με ίχνη (περίπου 1.5%) από βαρύτερα στοιχεία (άνθρακας, οξυγόνο, άζωτο), τα οποία στη «γλώσσα» της Αστροφυσικής είναι γνωστά ως «μέταλλα». Το 1904, ο Johannes Hartmann παρατηρώντας το φάσμα του δ Orionis, ενός φασματοσκοπικά διπλού αστέρα, ανακάλυψε ότι το σύνολο των γραμμών απορρόφησης του απλά ιονισμένου ατόμου ασβεστίου δεν υπόκειται στις περιοδικές μετατοπίσεις Doppler των γραμμών απορρόφησης όπως αναμένεται να συμβαίνει στο φάσμα ενός φασματοσκοπικά διπλού αστέρα. Με άλλα λόγια, ενώ τα μήκη κύματος των γραμμών απορρόφησης από τις φωτόσφαιρες των αστεριών του ζεύγους μετατοπίζονται μπρος και πίσω, καθώς τα άστρα περιστρέφονται στις τροχιές τους (Σχήμα 2.2), υπήρχαν ταυτόχρονα και γραμμές απορρόφησης τα μήκη κύματος των οποίων παρέμεναν αμετατόπιστα. Ο Hartmann συμπέρανε πως οι «ακίνητες γραμμές» προέκυπταν από την απορρόφηση που προκαλούσε το ψυχρό μεσοαστρικό νέφος του αερίου, το οποίο βρίσκεται μεταξύ του παρατηρούμενου διπλού αστέρα και της Γης. Με άλλα λόγια, η παρουσία «στάσιμων γραμμών» στο φάσμα γραμμών απορρόφησης των φασματοσκοπικά διπλών αστέρων μπορεί να εξηγηθεί με την υπόθεση ενός παρεμβαλλόμενου νέφους ψυχρού αερίου, καθώς οι γραμμές απορρόφησης που δημιουργούνται από αυτό θα δείξουν μια σταθερή μετατόπιση Doppler που αντιστοιχεί στη συνιστώσα της ταχύτητας του νέφους, κατά μήκος της διεύθυνσης του παρατηρητή. Προφανώς, δε θα συμμετέχουν στην περιοδική μετατόπιση εμπρός-πίσω των γραμμών απορρόφησης που σχηματίζονται στις φωτόσφαιρες των δύο αστέρων που κινούνται σε τροχιά. Μία άλλη επιβεβαίωση ήρθε αργότερα από τους Beals, Adams, Munch και Zirin, οι οποίοι βρήκαν άστρα με πολλαπλές γραμμές απορρόφησης, δηλαδή γραμμές που προέρχονται από το ίδιο το στοιχείο, αλλά βρίσκονταν σε διαφορετικές θέσεις λόγω φαινομένου Doppler. Επιπλέον, οι γραμμές αυτές ήταν σχετικά στενές σε σύγκριση με τις γραμμές απορρόφησης που παράγονται στις φωτόσφαιρες των μελετώμενων αστέρων. Αυτά τα στοιχεία δηλώνουν ότι το αέριο που παράγει τις μεσοαστρικές γραμμές απορρόφησης πρέπει να είναι σχετικά ψυχρό κι αραιό και να βρίσκεται σε διακριτές συμπυκνώσεις, που τις ονομάζουμε «νέφη», που κινούνται με συνάφεια ως ενότητες. Η συγκεκριμένη αντίληψη, ότι δηλαδή ο μεσοαστρικός χώρος δεν είναι άδειος (ένα αληθινό κενό), αλλά γεμάτος με μετακινούμενα νέφη αερίου, παραμένει η κεντρική παραδοχή στις περισσότερες μελέτες για το μεσοαστρικό χώρο.



Σχήμα 2.2: Μετατόπιση των γραμμών απορρόφησης στο φάσμα ενός φασματοσκοπικά διπλού συστήματος αστέρων.

2.1.3 Μοριακά Νέφη

Όπως αναφέραμε και στην ενότητα 2.1, το ISM αποτελείται κατά κύριο λόγο από αέριο υδρογόνο: ατομικό (ουδέτερο HI), μοριακό (H_2 σε μοριακά νέφη) ή ιονισμένο (περιοχές με HII, π.χ. πλάσμα). Γενικά, στο μεσοαστρικό χώρο το ατομικό αέριο είναι πιο διάχυτο, κατανέμημένο σε αρκετά μεγαλύτερες αποστάσεις απ' ότι το μοριακό και ως εκ τούτου είναι καταλληλότερο για τη δυναμική μελέτη γαλαξιών. Σε πιο αραιές περιοχές, οι ακτίνες X και γ καταστρέφουν τα μόρια και ιονίζουν τα άτομα, δημιουργώντας περιοχές ιονισμένου HII. Από την άλλη πλευρά, το μοριακό αέριο είναι λιγότερο εκτεταμένο, επειδή η δημιουργία μορίων διευκολύνεται σε πυκνές συγκεντρώσεις αερίου, τα «μοριακά νέφη». Πιο αναλυτικά, σε πυκνότητες: $\varrho \geq 10^2$ σωματίδια$/cm^3$ και σε θερμοκρασίες: $\mathrm{T} \sim 10\mathrm{K}$ το υδρογόνο στα μεσοαστρικά νέφη δεν παραμένει πλέον στην ατομική μορφή, αλλά τα άτομα υδρογόνου τείνουν να αντιδράσουν χημικά προς σχηματισμό μορίων, σύμφωνα με τη χημική εξίσωση: $\mathrm{H} + \mathrm{H} \longrightarrow \mathrm{H}_2$ και με την καταλυτική επίδραση των κόκκων σκόνης, για τους οποίους συζητήσαμε στην παράγραφο 2.1.1. Αυτές οι επιφάνειες λειτουργούν ως καταλύτες, προσφέροντας ευνοϊκές τοποθεσίες αντίδρασης όπου απορροφώνται η πλεονάζουσα ενέργεια και ορμή που απελευθερώνονται κατά την αντίδραση $\mathrm{H} + \mathrm{H} \longrightarrow \mathrm{H}_2$. Το νεοσχηματιζόμενο μόριο H_2 όμως θα μπορέσει να «επιζήσει» στο περιβάλλον του εξώτερου διαστήματος, όπου υπεριώδη φωτόνια τείνουν να διασπάσουν τα μόρια σε άτομα, μόνο εάν προφυλάσσεται στο σχετικά πυκνό περιβάλλον των μοριακών νεφών. Η μελέτη του μοριακού αερίου είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς τα μοριακά νέφη αποτελούν τις περιοχές αστρικής δημιουργίας για έναν γαλαξία. Ένα νέφος θα παραμένει σε υδροστατική ισορροπία όσο η κινητική ενέργεια του αερίου του (έστω $\overline{K}$ η μέση τιμή της) εξισορροπεί τη βαρυτική δυναμική ενέργειά του (έστω $\overline{U}$ η μέση τιμή της), δηλαδή ισχύει το **Θεώρημα virial**:

$$-2\overline{K} = \overline{U} \qquad [2.1]$$

Επίσης, έστω ότι $\overline{\mathrm{E}}$: η ολική εσωτερική ενέργεια του νέφους τότε ισχύει ότι $\overline{\mathrm{E}} = \overline{K} + \overline{U} \overset{2.1}{\Longrightarrow} \overline{U} = 2\overline{\mathrm{E}}$. Εάν ενα νέφος είναι αρκετά μαζικό ώστε η πίεση του αερίου (προς τα έξω) να μην είναι αρκετή ώστε να αντισταθμίσει τη βαρύτητά του (προς τα μέσα), τότε το νέφος θα αρχίσει να καταρρέει βαρυτικά, σύμφωνα με το **Κριτήριο Jeans**:

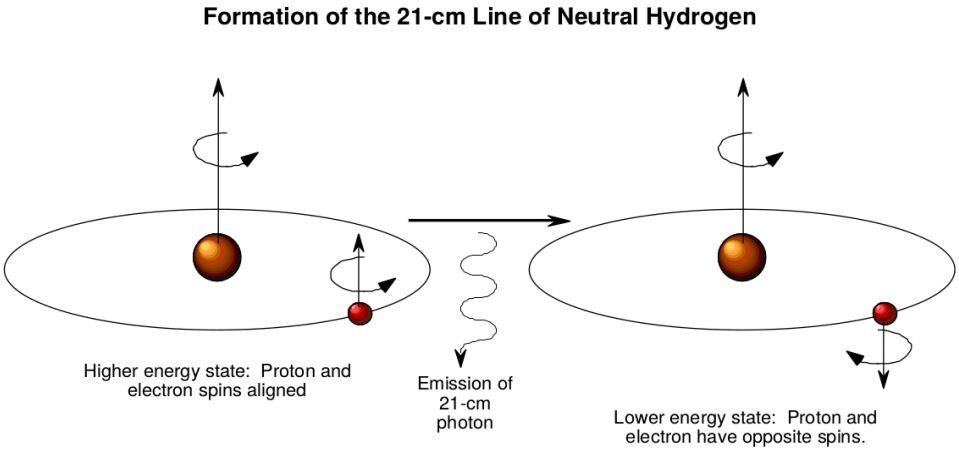
$$2\overline{K} < \mid \overline{U} \mid \qquad [2.2]$$

Οι χαμηλές θερμοκρασίες των μοριακών νεφών σε συνδυασμό με τις υψηλές τους πυκνότητες ευνοούν την εκπλήρωση του Κριτηρίου Jeans[3] άρα την κατάρρευση και εν συνεχεία το σχηματισμό αστέρων μέσα σε αυτές τις περιοχές.

Το κρύο αυτό μοριακό αέριο από το οποίο δημιουργούνται τα νέα άστρα δεν ανιχνεύεται όπως το ατομικό. Πιο αναλυτικά, το κρύο ατομικό αέριο HI ανιχνεύεται στη γραμμή των 21 cm, που οφείλεται σε μετάπτωση αντιστροφής του spin του

[3]Σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες όταν επιτυγχάνονται κατάλληλα υψηλές πυκνότητες η μεσοαστρική ύλη προτιμά να σχηματίζει μόρια παρά να μένει υπό μορφή ατόμων, κάτι το οποίο αποτελεί παράδειγμα της ισχύος του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής στις χαμηλές θερμοκρασίες.

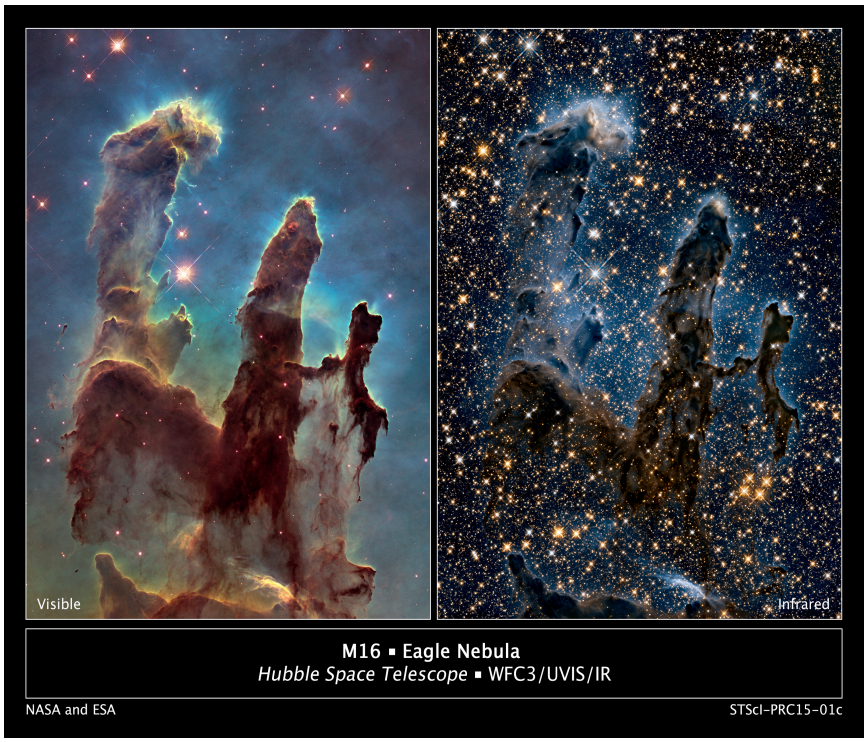
πρωτονίου και του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου. Συγκεκριμένα, λόγω του φαινομένου της υπέρλεπτης υφής, οι προσανατολισμοί των spin πρωτονίου και ηλεκτρονίου μπορεί να είναι είτε παράλληλοι είτε αντιπαράλληλοι και μεταξύ αυτών των δύο καταστάσεων υπάρχει ενεργειακή διαφορά, που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος ~21 cm. Η χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη (βασική) αντιστοιχεί σε αντιπαράλληλους προσανατολισμούς spin πρωτονίου-ηλεκτρονίου. Εάν το άτομο του υδρογόνου αποκτήσει ένα μικρό επιπλέον ποσό ενέργειας συγκρουόμενο με ένα άλλο άτομο ή ηλεκτρόνιο, τότε τα spin πρωτονίου-ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου μπορούν να αποκτήσουν όμοιο προσανατολισμό οδηγώντας το άτομο σε (χαμηλή) διεγερμένη κατάσταση. Εάν το άτομο χάσει αυτό το ποσό ενέργειας που το οδήγησε σε διέγερση, αποδιεγειρεται επιστρέφοντας στη βασική στάθμη και εκπέμπεται ένα φωτόνιο με μήκος κύματος 21.11cm. Μία σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση της δημιουργίας της γραμμής 21cm στην οποία ανιχνεύεται το ατομικό υδρογόνο HI.
Πηγή: (Fisher, 1998)

Η γραμμή αυτή προέρχεται από περιοχές HI και η ανίχνευσή της είναι ο μόνος τρόπος εντοπισμού τους. Επειδή είναι ιδιαίτερα στενή αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τη μέτρηση των ταχυτήτων των νεφών HI, μέσω του φαινομένου Doppler, κι έτσι μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τη δυναμική των νεφών αυτών. Η γραμμή των 21 cm παρατηρείται σε εκπομπή και σε απορρόφηση. Ενώ το κρύο HI ανιχνεύεται στη γραμμή των 21 cm, οι μεταβάσεις του μοριακού H_2 έχουν υψηλότερες ενέργειες διέγερσης και δεν ανιχνεύουν το κρύο μοριακό αέριο. Το μοριακό υδρογόνο δεν έχει ραδιοφωνικές γραμμές, επομένως σε αντίθεση με το ατομικό υδρογόνο δε μπορεί να παρατηρηθεί απ' ευθείας με ραδιοαστρονομικές τεχνικές. Η ανίχνευση των περιοχών H_2 θα μπορούσε να γίνει από την εκλυόμενη ενέργεια της αντίδρασης σχηματισμού του: $H + H \longrightarrow H_2$. Ωστόσο, όπως αναφέραμε παραπάνω η ενέργεια αυτή απορροφάται από τους κόκκους της σκόνης, στην επιφάνεια των οποίων πραγματοποιείται η αντίδραση. Έτσι, ο εντοπισμός των περιοχών κρύου μοριακού αερίου H_2 γίνεται έμμεσα μέσω των γραμμών των: CO, HCN, CN, CH, CHO^+, OH^-, κ.ά. Αυτό καθίσταται εφικτό διότι πολλά τέτοια μόρια, που έχουν ανιχνευθεί στις πυκνές περιοχές των μοριακών νεφών προστατευμένα από τις καταστρεπτικές ιδιότητες των υπεριώδων φωτονίων, μπορούν να

παρατηρηθούν μέσω γραμμών, οι οποίες προκύπτουν γιατί τα μόρια αυτά με απλές συγκρούσεις (ακόμη και σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, λίγο πάνω από το απόλυτο μηδέν) μπορούν να αλλάξουν την κατάσταση περιστροφής του ηλεκτρονίου άρα και τη στροφορμή του, διεγείροντας έτσι το μόριο σε κατάσταση μεγαλύτερης ενέργειας. Αποδιεγειρόμενα τα μόρια δίνουν mm γραμμές, κυριότερη εκ των οποίων είναι η γραμμή του δεύτερου πιο συνήθους μορίου στο Σύμπαν, του CO, στα 2.6 mm.



Σχήμα 2.4: Φωτογραφία του μοριακού νέφους Pillars of Creation, που βρίσκεται στο νεφέλωμα του Αετού (Eagle Nebula or M16).Η φωτογραφία αποκαλύπτει τρεις γιγάντιες στήλες κρύου αερίου στις οποίες παρατηρείται έντονη αστρογένεση. Η φωτογραφία λήφθηκε το 2014 με την Wide Field Camera 3 του διαστημικού τηλεσκοπίου Hubble (HST). *Αριστερά:* Οπτικό. *Δεξιά:* Κοντινό υπέρυθρο.
Πηγή: NASA, HST website: https://www.nasa.gov/content/goddard/hubble-goes-high-definition-to-revisit-iconic-pillars-of-creation

2.1.4 Υπολογισμός της μάζας του H_2 μέσω του πηλίκου μαζών H_2/CO

Η μάζα του H_2 βρίσκεται αναγωγικά, μέσω του πηλίκου μαζών H_2/CO, δεχόμενοι σταθερή αναλογία μεταξύ των δύο μορίων. Πιο αναλυτικά, για να υπολογίσουμε τη μάζα του μοριακού αερίου υδρογόνου που σχετίζεται με την εκπομπή του CO χρησιμοποιούμε τη σχέση (Solomon et al., 1997):

$$M(H_2) = 3.25 \cdot 10^7 \cdot \alpha_{CO(1-0)} S_{CO(1-0)} \Delta V \frac{D_L^2}{\nu_{obs}^2 (1+z)^3} [\, M_\odot] \qquad [2.3]$$

όπου:

- $\alpha_{CO(1-0)}$: είναι ο παράγοντας μετατροπής της έντασης ακτινοβολίας του CO(1-0) σε μάζα H_2 σε $[\, M_\odot / K \,\mathrm{km\,s^{-1}} pc^2]$
- $S_{CO(1-0)} \cdot \Delta V$: είναι η ολοκληρωμένη ροή της γραμμής CO(1-0) σε $[Jy\,\mathrm{km\,s^{-1}}]$
- ν_{obs}: είναι η παρατηρούμενη συχνότητα του CO(1-0) σε $[GHz]$
- z: η ερυθρομετατόπιση του παρατηρούμενου γαλαξία
- D_L: η απόσταση λαμπρότητας ("Luminocity Distance") του παρατηρούμενου γαλαξία σε $[Mpc]$

2.2 Βασικά Στοιχεία Ραδιοαστρονομίας

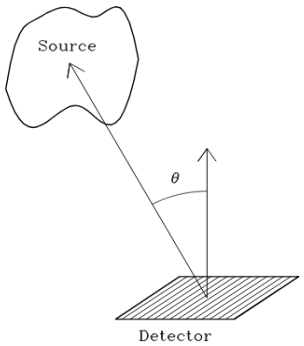
2.2.1 Γενικά

Μετά την ανακάλυψη των ραδιοσημάτων από το διάστημα από τον K. Jansky (1931) άρχισε η ανάπτυξη του κλάδου της Ραδιοαστρονομίας. Όπως είναι γνωστό η γήινη ατμόσφαιρα είναι εντελώς διαφανής στην ακτινοβολία με μήκος κύματος μεταξύ: $\sim 10mm$ και $\sim 10m$. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας είναι σχεδόν ολική γύρω στα $0.55mm$ (μεταξύ $\sim 0.5mm$ και $\sim 10mm$ η απορρόφηση οφείλεται στο οξυγόνο και στους υδρατμούς της ατμόσφαιρας), ενώ η ακτινοβολία με μήκος κύματος $\lambda > 50m$ δε φτάνει στο έδαφος, γιατί ανακλάται από την ιονόσφαιρα. Με τα ραδιοτηλεσκόπια ανιχνεύται ακτινοβολία με μήκος κύματος $\lambda > 0.1mm$, δηλαδή ακτινοβολία που αντιστοιχεί σε συχνότητες $\nu < 3 \cdot 10^{-21}\mathrm{H}z$ ή ενέργειες φωτονίων $E < 0.01eV$.

Γενικά, η στοιχειώδης ισχύς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας dW που συλλέγει μία στοιχειώδης ανιχνευτική επιφάνεια dA, μέσα σε ένα στοιχειώδες εύρος συχνοτήτων $d\nu$ και σε στοιχειώδη στερεά γωνία $d\Omega$ δίνεται από την ακόλουθη σχέση, η οποία αποτελεί τη σχέση ορισμού της ειδικής έντασης ακτινοβολίας ή επιφανειακής λαμπρότητας(specific intensity or surface brightness) I_ν:

$$dW = \frac{dE}{dt} \equiv I_\nu \cdot dA \cos\theta \cdot d\Omega \cdot d\nu \qquad [2.4]$$

Να σημειωθεί ότι στην παραπάνω σχέση, θ είναι η γωνία μεταξύ μίας «ακτίνας» της ακτινοβολίας και της καθέτου στη συλλεκτική επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Στο cgs οι μονάδες της ειδικής έντασης ακτινοβολίας είναι: $[I_\nu] = erg \cdot cm^{-2} Hz^{-1} sterad^{-1} s^{-1}$. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ειδική ένταση ακτινοβολίας είναι ανεξάρτητη της απόστασης της πηγής από τον παρατηρητή. Βέβαια, εξαρτάται από τη θέση/διεύθυνση παρατήρησης, κάτι το οποίο σχετίζεται με τον τρόπο εκπομπής της πηγής κι όχι με τον ίδιο τον παρατηρητή. Επομένως, ισχύει ότι: $I_\nu = I_\nu(\theta, \phi)$, όπου θ: η αζιμουθιακή γωνία και ϕ: η πολική γωνία των σφαιρικών συντεταγμένων.



Σχήμα 2.5: Μέτρηση της ειδικής έντασης ακτινοβολίας I_ν μιας πηγής από μία ανιχνευτική επιφάνεια, της οποίας το κάθετο άνυσμα σχηματίζει γωνία θ με μία «ακτίνα» από την πηγή.
Πηγή: National Radio Astronomy Observatory (NRAO): https://www.cv.nrao.edu/course/astr534/Brightness.html

Ολοκληρώνοντας την ειδική ένταση ακτινοβολίας σε όλη τη στερεά γωνία της πηγής Ω_S βρίσκουμε τη ροή ακτινοβολίας S_ν στη συχνότητα ν:

$$S_\nu = \int_{\Omega_S} I_\nu \cos\theta d\Omega \qquad [2.5]$$

Αν το γωνιακό μέγεθος της πηγής είναι: $\theta \ll 1$ rad (όπως συμβαίνει συχνά στις αστρονομικές πηγές) τότε ισχύει ότι: $\cos\theta \approx 1$ και η προηγούμενη έκφραση απλοποιείται:

$$S_\nu = \int_{\Omega_S} I_\nu d\Omega \qquad [2.6]$$

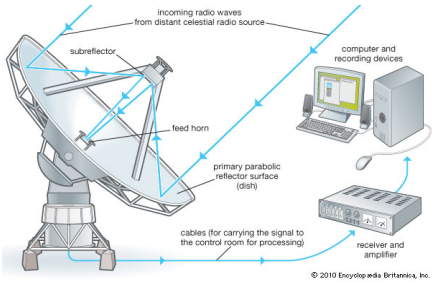
Ως μονάδα μέτρησης της ροής ακτινοβολίας σε αυτά τα μήκη κύματος είναι βολικό να χρησιμοποιείται το Jansky (Jy). Ισχύει ότι: $1Jy = 10^{-26}Wm^{-2}Hz^{-1}(SI) = 10^{-23}erg\cdot s^{-1}cm^{-2}Hz^{-1}(cgs)$. Η ένταση των πηγών στο mm συνήθως κυμαίνεται από $0.1\ mJy$ έως $1\ Jy$.

Η ακτινοβολία των περισσότερων πηγών στο mm είναι θερμική ή ακτινοβολία σύγχροτρον. Στην περίπτωση της θερμικής ακτινοβολίας το φάσμα τους ακολουθεί το νόμο του Planck στο όριο Rayleigh-Jeans ($h\nu/k_BT \ll 1$):

$$I_\nu(\theta,\phi) = \frac{2k_BT(\theta,\phi)\nu^2}{c^2} \Rightarrow S_\nu = \frac{2k_B\nu^2}{c^2}\int T(\theta,\phi)d\Omega \qquad [2.7]$$

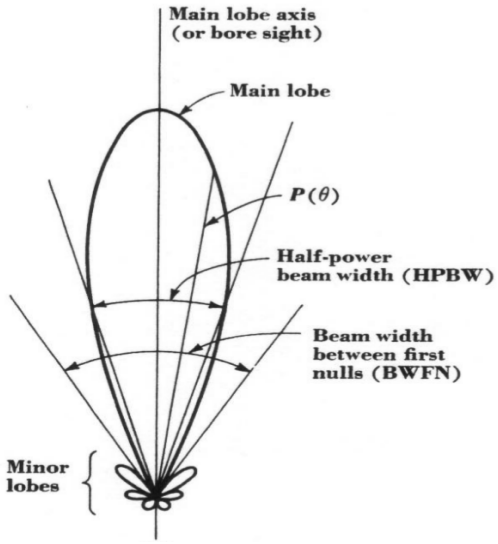
Η ακτινοβολία τους μπορεί, όμως, να είναι και μη-θερμική ακτινοβολία σύγχροτρον, που παράγεται από ενεργητικά ηλεκτρόνια κινούμενα μέσα σε μαγνητικά πεδία, και το φάσμα τους σε αυτήν την περίπτωση είναι της μορφής: $S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$, όπου α: ο φασματικός δείκτης της πηγής (ενδεικτικά αναφέρουμε ότι για πολλές πηγές το α λαμβάνει τιμές στο εύρος: $0.2 \leq \alpha \leq 1.2$).

Η ακτινοβολία σε αυτά τα μήκη κύματος συλλέγεται με ραδιοτηλεσκόπια. Συνοπτικά, ένα ραδιοτηλεσκόπιο αποτελείται από τα εξής μέρη: την κεραία (antenna), το δέκτη (receiver) και διάφορες συσκευές, όπου γίνεται το φιλτράρισμα (filter), η ενίσχυση (amplifier) και η καταγραφή του σήματος. Τα βασικά μέρη ενός ραδιοτηλεσκοπίου φαίνονται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Βασικά Μέρη ενός Ραδιοτηλεσκοπίου.
Πηγή: Encyclopaedia Britannica, Inc.: https://www.britannica.com/science/radio-astronomy

Η κεραία σε ένα ραδιοτηλεσκόπιο ενεργεί ως συλλέκτης ραδιοκυμάτων και μπορεί να έχει σχήμα παραβολοειδές ή σφαιρικό. Διαθέτει έναν άξονα συμμετρίας και οποιαδήποτε διεύθυνση είναι δυνατόν να καθοριστεί από τις γωνίες θ και ϕ[4] σε σχέση με τον άξονα αυτό. Η διεύθυνση από την οποία λαμβάνουμε τη μεγαλύτερη ισχύ αποτελεί τον κύριο άξονα της κεραίας και σχεδόν πάντα συμπίπτει με τον άξονα συμμετρίας της. Η απόδοση της κεραίας ως προς την ακτινοβολία που συλλέγει ανά διεύθυνση περιγράφεται από τη συνάρτηση $P_N(\theta, \phi)$, η γραφική παράσταση της οποίας δίνει το κανονικοποιημένο **διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας (antenna pattern)**. Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται η τομή του κανονικοποιημένου διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας, όπου παρατηρείται ο κύριος λοβός (main lobe) και οι δευτερεύοντες λοβοί (side lobes). Ως γωνιακό εύρος του κύριου λοβού θεωρείται εκείνο που σχηματίζεται από τις διευθύνσεις που ορίζονται από εκείνα τα σημεία του, όπου η ισχύς είναι ίση με το μισό της μέγιστης τιμής της, κάτι το οποίο είναι γνωστό ως: **"Half Power Beam Width" (HPBW)**. Προσομοιώνοντας την εκπομπή της ακτινοβολίας του κύριου λοβού με μία συνάρτηση Gauss και παίρνοντας μία τομή στο **"Full Width Half Maximum" (FWHM)** αυτής έχουμε τη λεγόμενη **"primary beam"**[5]. Στην ουσία δηλαδή η "primary beam" είναι η προβολή στο επίπεδο της παρατήρησης του κύριου λοβού της ακτινοβολίας που συλλέγει ένα ή περισσότερα ραδιοτηλεσκόπια από μία ραδιοπηγή. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό μέγεθος για τις κεραίες είναι η **ενεργός επιφάνεια (effective area)** A_e, που αντιπροσωπεύει το μέρος της επιφάνειας του μετώπου του κύματος από το οποίο η κεραία συγκεντρώνει την ισχύ και είναι μικρότερη από την πραγματική επιφάνεια της κεραίας (περίπου μεταξύ 0.5 και 0.9 της πραγματικής).



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κεραίας.
Credit: James Di Francesco. Πηγή: National Radio Astronomy Observatory (NRAO): https://science.nrao.edu/science/meetings/presentation/jdf.webinar.1.pdf

Όμως, τι ανιχνεύει στην πραγματικότητα ένα ραδιοτηλεσκόπιο; Από τη σχέση 2.4 (για $\theta \ll 1$), για ενεργό επιφάνεια κεραιάς A_e το ραδιοτηλεσκόπιο θα ανιχνεύει ισχύ, από μία πηγή με ειδική ένταση ακτινοβολίας I_ν, που θα δίνεται από τη σχέση[6]:

$$dW_\nu^{rec} = \frac{1}{2}\mathrm{I}_\nu A_e d\Omega$$

[4]όπου θ: η αζιμουθιακή γωνία και ϕ: η πολική γωνία των σφαιρικών συντεταγμένων.

[5]Ελλείψει ελληνικής απόδοσης του όρου, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα χρησιμοποιούμε τη διεθνή ορολογία "primary beam" ή πιο απλά "beam". Επίσης, να σημειωθεί ότι το FWHM της "primary beam" διεθνώς ονομάζεται "beamwidth"

[6]Ο παράγοντας $\frac{1}{2}$ σε αυτήν τη σχέση προκύπτει από το γεγονός ότι οι μετρήσεις της ισχύος γίνονται μέσω ενός καναλιού πόλωσης. Με άλλα λόγια, έχουμε εξάγει αυτή τη σχέση θεωρώντας ότι η μέτρηση έγινε από ένα ραδιοτηλεσκόπιο, με μόνο μία πόλωση, ενώ υποθέτουμε ότι η ακτινοβολία από την πηγή δεν είναι πολωμένη (η ισχύς είναι η ίδια για δύο αντίθετες ή ορθογώνιες μεταξύ τους πολώσεις).

Όμως, το ραδιοτηλεσκόπιο είναι ευαίσθητο σε σήματα από περισσότερες της μίας κατεύθυνσης και αυτή του η ευαισθησία ποσοτικοποιείται, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, από το κανονικοποιημένο διάγραμμα της κεραίας $P_N(\theta, \phi)$. Επομένως, η ισχύς την οποία καταγράφει ένα ραδιοτηλεσκόπιο δίνεται από τη σχέση:

$$W_\nu^{rec} = \frac{1}{2} A_e \int \mathrm{I}_\nu(\theta, \phi) P_N(\theta, \phi) d\Omega \qquad [2.8]$$

2.2.2 Βασικά Μεγέθη Κεραιών

Μερικά βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν μια κεραίας ραδιοτηλεσκοπίου είναι: η στερεά γωνία Ω_A, η κατευθυντικότητα της κεραίας d, η απολαβή της κεραίας $G(\theta, \phi)$ και η θερμοκρασίας της κεραίας $\mathrm{T_A}$. Ας τα εξετάσουμε πιο αναλυτικά:

- **Στερεά Γωνία Ακτινοβολίας της Κεραίας ("Beam Area")**: Συμβολίζεται με Ω_A και ορίζεται ως η στερεά γωνία μέσα από την οποία θα έρρεε όλη η ισχύς εάν η ειδική ένταση ακτινοβολίας που συλλέγει η κεραία ήταν σταθερή και ίση με τη μέγιστη τιμή της. Μαθηματικά ορίζεται ως το ολοκλήρωμα:

$$\Omega_\mathrm{A} = \int P_N(\theta, \phi) d\Omega \qquad [2.9]$$

- **Κατευθυντικότητα της Κεραίας ("Directivity")**: Συμβολίζεται με d και ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος που ακτινοβολείται από την κεραία στη διεύθυνση $P_N = 1$ προς τη μέση ισχύ (προς όλες τις κατευθύνσεις). Μεταξύ της κατευθυντικότητας της κεραίας d και της στερεάς γωνίας ακτινοβολίας της κεραίας Ω_A ισχύει η σχέση:

$$d = \frac{4\pi}{\Omega_\mathrm{A}} \qquad [2.10]$$

  Επίσης, μεταξύ της ενεργού επιφάνειας A_e και της κατευθυντικότητας d της κεραίας ισχύει η σχέση:

$$d = \frac{4\pi}{\lambda^2} \mathrm{A}_e \qquad [2.11]$$

  Συνδυάζοντας τις σχέσεις 2.10 και 2.11 βρίσκουμε μία σχέση μεταξύ της στερεάς γωνίας ακτινοβολίας της κεραίας Ω_A και της ενεργού επιφάνειας A_e:

$$\mathrm{A}_e \cdot \Omega_\mathrm{A} = \lambda^2 \qquad [2.12]$$

- **Απολαβή ("Gain")**: Συμβολίζεται με $G(\theta, \phi)$ και για μία κεραία που λειτουργεί ως συλλέκτης ακτινοβολίας αποτελεί ένα μέτρο της απόδοσής της. Δηλαδή περιγράφει το πόσο αποδοτική είναι η κεραία στο να μετατρέπει τα ραδιοκύματα που φτάνουν σε αυτήν από κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση σε ηλεκτρική ισχύ. Μαθηματικά συνδέεται με την κατευθυντικότητα και το κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας μέσω της σχέσης:

$$G(\theta, \phi) = d \cdot P_N(\theta, \phi) \qquad [2.13]$$

- **Θερμοκρασία Κεραίας ("Antenna Temperature")**: Συμβολίζεται με T_{A} και δε συνδέεται με τη θερμοκρασία του υλικού της κεραίας, αλλά εξαρτάται από τη θερμοκρασία των ραδιοπηγών. Είναι ένα μέτρο της ισχύος που καταγράφει η κεραία και ορίζεται ως:

$$W_{\nu}^{rec} = k_B T_A \qquad [2.14]$$

Από τις σχέσεις 2.8 και 2.14 έχουμε:

$$\mathrm{T_A} = \frac{1}{2k_B} A_e \int \mathrm{I}_{\nu}(\theta, \phi) P_N(\theta, \phi) d\Omega \qquad [2.15]$$

Η θερμοκρασία κεραίας T_{A} δε θα πρέπει να συγχέεται με τη θερμοκρασία λαμπρότητας, η οποία χαρακτηρίζει συχνά μία πηγή ραδιοφωνικής ακτινοβολίας. Ως **θερμοκρασία λαμπρότητας ("brightness temperature")** T_B μιας πηγής σε συγκεκριμένη συχνότητα ορίζεται η θερμοκρασία του αντίστοιχου μελανού σώματος που έχει επιφανειακή λαμπρότητα ίση με αυτή της πηγής στη συγκεκριμένη συχνότητα. Για τις ραδιοπηγές, που συνήθως ισχύει η προσέγγιση Rayleigh-Jeans, έχουμε:

$$I_{\nu} = \frac{2\nu^2 k_B T_{\mathrm{B}}}{c^2} \Leftrightarrow T_B = \frac{c^2}{2\nu^2 k_B} I_{\nu} \qquad [2.16]$$

2.2.3 Διακριτική Ικανότητα Ραδιοτηλεσκοπίου και Ραδιοσυμβολόμετρου

Η γωνιακή διακριτική ικανότητα ενός ραδιοτηλεσκοπίου, δηλαδή η ικανότητά του να διακρίνει δύο πηγές που βρίσκονται πολύ κοντά η μία στην άλλη, δίνεται από τη σχέση:

$$\theta \sim \frac{\lambda}{D} \qquad [2.17]$$

όπου λ: το μήκος κύματος της παρατηρούμενης ακτινοβολίας και D: η διάμετρος της κεραίας του ραδιοτηλεσκοπίου. Όπως είναι προφανές από αυτή τη σχέση, στις περιοχές λειτουργίας των ραδιοτηλεσκοπίων όπου το λ είναι πολύ μεγάλο, για να πετύχουμε ικανοποιητικές τιμές διακριτικής ικανότητας πρέπει να χρησιμοποιήσουμε πολύ μεγάλες κεραίες.

Επειδή, αυτό είναι δύσκολο ή ακόμη και αδύνατο κατά περιπτώσεις, στη Ραδιοαστρονομία χρησιμοποιείται πολύ συχνά η τεχνική της συμβολομετρίας. Συνοπτικά, η ραδιοσυμβολομετρία συνίσταται στη χρήση δύο ή περισσότερων μικρότερων κεραιών οι οποίες συνδέονται, αντί να έχουμε μία κεραία με πολύ μεγάλη διάμετρο. Το μεγαλύτερο ραδιοσυμβολόμετρο σήμερα είναι η ALMA, για την οποία θα συζητήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο. Η γωνιακή διακριτική ικανότητα ενός ραδιοσυμβολόμετρου, δίνεται από τη σχέση:

$$\theta \sim \frac{\lambda}{\mathrm{B}_{max}} \qquad [2.18]$$

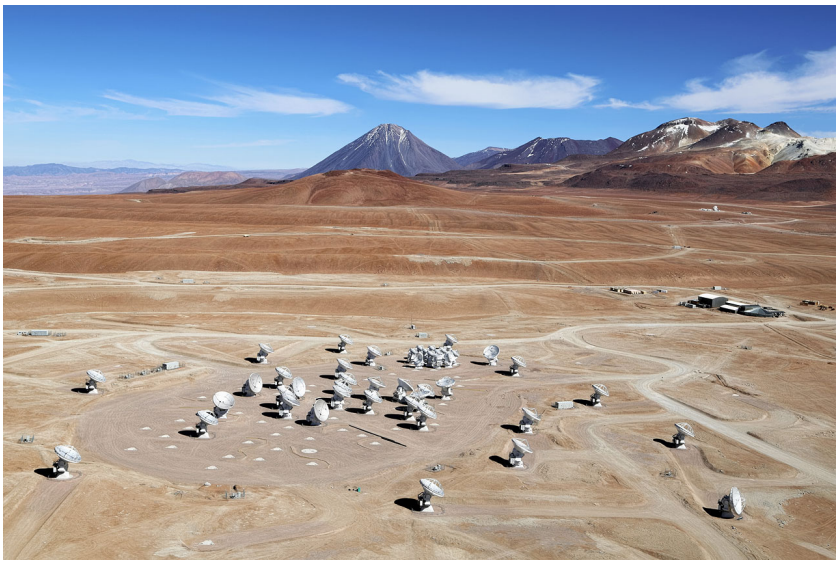
όπου B_{max}: το μήκος της μεγαλύτερης "baseline". Στη Ραδιοαστρονομία ο όρος "baseline" αναφέρεται στην απόσταση που έχουν δύο κεραίες - μέρη του ευρύτερου συστήματος του συμβολόμετρου - μεταξύ τους. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα χρησιμοποιούμε το διεθνή όρο **baseline** για να αναφερθούμε σε αυτήν τη χαρακτηριστική απόσταση.

Κεφάλαιο 3

Όργανα και Δεδομένα

3.1 Η Συστοιχία Ραδιοτηλεσκοπίων ALMA

Η Συστοιχία Ραδιοτηλεσκοπίων **ALMA** (**A**tacama **L**arge **M**illimeter **A**rray) βρίσκεται στο οροπέδιο Chajnantor της ερήμου Ατακάμα στη βόρεια Χιλή, σε υψόμετρο 5000 m. Αποτελείται από 66 υψηλής ακρίβειας ραδιοτηλεσκόπια και λειτουργεί σε μήκη κύματος από 0.32 mm έως 3.6 mm. Η κύρια συστοιχία ραδιοτηλεσκοπίων της ALMA αποτελείται από 50 ραδιοφωνικές κεραίες, κάθε μία εκ των οποίων έχει διάμετρο 12 m, ενώ όλες μαζί λειτουργούν σαν ένα τηλεσκόπιο μέσω της τεχνικής της συμβολομετρίας. Η ALMA περιλαμβάνει και τη συστοιχία ACA (ALMA Compact Array) που αποτελείται από: 4 ραδιοτηλεσκόπια διαμέτρου 12 m το καθένα και 12 ραδιοτηλεσκόπια διαμέτρου 7 μέτρων έκαστο. Τα 66 ραδιοτηλεσκόπια μπορούν να διαταχθούν σε διαφορετικούς σχηματισμούς κατά τους οποίους η απόσταση μεταξύ των κεραιών μπορεί να ποικίλλει από 150 m έως 16 km, κάτι το οποίο δίνει στην ALMA τη δυνατότητα ισχυρής και μεταβλητής ανάλυσης ("zoom").



Σχήμα 3.1: Εναέρια λήψη του οροπεδίου Chajnantor σε υψόμετρο 5000 m στις Άνδεις της Χιλής όπου βρίσκεται η Συστοιχία Ραδιοτηλεσκοπίων ALMA.
Credit:Clem & Adri Bacri-Normier (wingsforscience.com)/ESO
Πηγή: ESO website: http://www.eso.org/public/images/eso1312a/

Η ακτινοβολία στα μήκη κύματος στα οποία λειτουργεί η ALMA προέρχεται από τεράστια κρύα νέφη του μεσοαστρκού χώρου, με θερμοκρασίες μερικών δεκάδων βαθμών πάνω από το απόλυτο μηδέν και από μερικούς από τους πρωτους και μακρινότερους γαλαξίες του Σύμπαντος. Επομένως, είναι ιδανικό εργαλείο για τη μελέτη των χημικών ιδιοτήτων και των φυσικών συνθηκών των μοριακών νεφών, στα οποία δύναται να λάβει χώρα η αστρογένεση. Όπως εξηγήσαμε και στο Κεφάλαιο 2 (Ενότητα 2.1.3) συχνά αυτές οι περιοχές του μεσοαστρικού χώρου είναι σκοτεινές και κρυμένες από το ορατό φως, αλλά πολύ λαμπρές σε millimetre και submillimetre μήκη κύματος (τα οποία βρίσκονται μεταξύ της περιοχής του μακρινού υπέρυθρου και της ραδιοφωνικής περιοχής του Η/Μ φάσματος). Η ακτινοβολία σε αυτά τα μήκη κύματος απορροφάται ισχυρά από τους υδρατμούς της γήινης ατμόσφαιρας και γι αυτό τηλεσκόπια όπως η ALMA πρέπει να χτίζονται σε μεγάλου υψόμετρου ξηρές περιοχές, όπως είναι το οροπέδιο Chajnantor σε υψόμετρο 5000 m, μία από τις πιο άνυδρες περιοχές της Γης. Η ALMA αποτελεί ένα διεθνές αστεροσκοπείο, μία παγκόσμια συνεργασία μεταξύ του European Southern Observatory (ESO), του National Science Foundation (NSF) των Ηνωμένων Πολιτειών και των National Institutes of Natural Sciences (NINS) της Ιαπωνίας σε συνεργασία με τη Δημοκρατία της Χιλής.

3.2 Τα Δεδομένα της ALMA

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας λήφθηκαν από τη συστοιχία ραδιοτηλεσκοπίων **ALMA** στην έρημο Ατακάμα της Χιλής. Η ALMA παρατήρησε το γαλαξία 4C12.50 το Μάϊο (band 7) και τον Ιούλιο (band 3) του 2015, όταν η συστοιχία είχε 37 ραδιοτηλεσκόπια σε λειτουργία. Οι παρατηρήσεις, οι οποίες ήταν μέρος του κύκλου 2 του προγράμματος 2013.1.00180.S (PI Dasyra), λήφθηκαν σε τρεις φασματικές περιοχές ή «μπάντες»: 3, 7 και 8. Σε όλες τις περιοχές χρησιμοποιήθηκαν 4 φασματικά «παράθυρα» εύρους 1.875 GHz. Στη μπάντα 3, χρησιμοποιήσαμε ένα φασματικό παράθυρο για να καλύψουμε το εύρος ταχυτήτων: από -3300 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως 2100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ γύρω από τη γραμμή CO(1-0) και ένα φασματικό παράθυρο για να καλύψουμε το εύρος ταχυτήτων: από -3800 $\mathrm{km\,s^{-1}}$έως 1100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ γύρω από τη γραμμή HCS+(3-2). Τα 2 άλλα φασματικά παράθυρα χρησιμοποιήθηκαν για παρατήρηση του συνεχούς σε σύστημα ηρεμίας 2.641($\pm$0.026) mm και 2.364($\pm$0.021) mm. Στη μπάντα 7, χρησιμοποιήσαμε 2 μερικώς αλληλοεπικαλυπτόμενα φασματικά παράθυρα για να καλύψουμε τα εύρη ταχυτήτων: από -2600 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως 900 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ γύρω από τη γραμμή CO(3-2) και 2 φασματικά παράθυρα για τη λήψη του συνεχούς σε σύστημα ηρεμίας: 896($\pm$3) μm και 902($\pm$3) μm. Στη μπάντα 8, χρησιμοποιήσαμε 2 φασματικά παράθυρα για να καλύψουμε τα εύρη ταχυτήτων: από -1350 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως 840 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ γύρω από τη γραμμή CO(4-3), ένα φασματικό παράθυρο για τον εντοπισμό της γραμμής HCO+(5-4) και ένα φασματικό παράθυρο για τη λήψη του συνεχούς σε σύστημα ηρεμίας: 668.4($\pm$1.7) μm. Για τις παρατηρήσεις των γραμμών επιλέξαμε ένα "bin"[1] ταχυτήτων εύρους 5($\pm$1) $\mathrm{km\,s^{-1}}$, το οποίο είναι κατάλληλο για την ανίχνευση

[1]Το "binning" δεδομένων είναι μια τεχνική προ-επεξεργασίας δεδομένων που χρησιμοποιείται για τη μείωση των επιπτώσεων των μικρών σφαλμάτων της παρατήρησης. Οι αρχικές τιμές δεδομένων που εμπίπτουν σε ένα δεδομένο μικρό διάστημα, που λέγεται "bin", αντικαθίστανται από μια τιμή, η οποία είναι αντιπροσωπευτική του εν λόγω διαστήματος, συχνά την κεντρική τιμή του.

γραμμών που προέρχονται από μικρές συγκεντρώσεις νεφών (είτε σε εκπομπή είτε σε απορρόφηση μπροστά από ένα υπόβαθρο συνεχούς εκπομπής). Για τις παρατηρήσεις του συνεχούς διαλέξαμε ένα πιο χονδρικό "bin" ταχυτήτων εύρους από: $\sim$20 km s^{-1} έως $\sim$90 km s^{-1}.

Για να δημιουργήσουμε τους κύβους δεδομένων, χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό **CASA** (**C**ommon **A**stronomy **S**oftware **A**pplications), το οποίο αναπτύχθηκε από το Ευρωπαϊκό Αστεροσκοπείο του Νοτίου Ημισφαιρίου **ESO**. Οι αλγόριθμοι βαθμονόμησης έγιναν με τις εκδόσεις της CASA: 4.3.1, 4.2.2 και 4.3.1 για τις μπάντες 3,7 και 8, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των αυτοματοποιημένων pipeline αποκαταστάθηκαν για τις μπάντες 3 και 7. Για τη μπάντα 8, οι βαθμονομήσεις βελτιστοποιήθηκαν απορρίπτοντας τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τις κεραίες DA34 και DV02, επειδή ένα σφάλμα στη βάση δεδομένων της θέσης τους προκάλεσε υψηλές θερμοκρασίες στο σύστημα. Έπειτα, οι αλγόριθμοι βαθμονόμησης υπολόγισαν την εξάτμιση του νερού και τη θερμοκρασία του συστήματος βρίσκοντας τις λύσεις της βαθμονόμησης για τη θέση των κεραιών, τις οποίες εφάρμοσαν στο σετ των μετρήσεων, δηλαδή στις «ορατότητες» (visibilities) όλων των baselines[2],των φασματικών παραθύρων και των πεδίων των στόχων. Στη συνέχεια, αφαίρεσαν τα σχετικά φασματικά παράθυρα και συνέχισαν με την απόκρυψη των προβληματικών περιοχών. Έπειτα, αποδόθηκε ένα μοντέλο ροής στο βαθμονομητή και υπολογίστηκαν οι αναλυτικές εκφράσεις για την "bandpass calibration" (ροή vs. συχνότητα) και την "gain calibration" (ροή vs. χρόνος). Η λύση για τη βαθμονόμηση της ροής βρέθηκε χρησιμοποιώντας το γαλαξία 3C273 στη μπάντα 7 και το δορυφόρο του Κρόνου, Τιτάνα, στις μπάντες 3 και 8. Μερικές από τις baselines[2] της μπάντας 8 έπρεπε να εξαιρεθούν εξαιτίας της έκτασης του Τιτάνα. Σε όλες τις μπάντες, η λύση της "bandpass calibration" βρέθηκε χρησιμοποιώντας τον QSO J1256-0547 (3C279). Η φάση ("phase calibration") «αυτο-βαθμονομήθηκε» χρησιμοποιώντας τον 4C12.50.

Μόλις εφαρμόστηκαν οι βαθμονομήσεις, οι «ορατότητες» (visibilities) των επιλεγμένων πεδίων μετατράπηκαν σε κύβους εικόνων χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο "clean". Για το κομμάτι της απεικόνισης (imaging) χρησιμοποιηθηκέ η έκδοση 4.6 της CASA. Η ανακατασκευή των εικόνων (image reconstruction) εκτελέστηκε με τον ίδιο αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε και για τον καθαρισμό της beam. Κατά τη φάση της ανακατασκευής των εικόνων, τα δεδομένα που λήφθηκαν για την επιστημονική μελέτη του 4C12.50 συγχωνεύθηκαν με τα δεδομένα για τον ίδιο γαλαξία τα οποία είχαν ληφθεί με στόχο τη βαθμονόμηση. Πραγματοποιήσαμε αυτή τη συγχώνευση με σκοπό τη μέγιστη δυνατή κάλυψη του uv πεδίου, καθώς με την προσθήκη των δεδομένων τα οποία λήφθηκαν με τον 4C12.50 όχι ως κύριο στόχο, αλλά ως βαθμονομητή, καταφέραμε να έχουμε δεδομένα με ελαφρώς μεγαλύτερο συνολικό χρόνο έκθεσης του τηλεσκοπίου στην πηγή. Ως επιστημονικός στόχος, ο γαλαξίας 4C12.50 παρατηρήθηκε για: 24.4, 5.2 και 24 λεπτά, ενώ ως βαθμονομητής φάσης παρατηρήθηκε για: 2.0, 0.8 και 2.0 λεπτά στις μπάντες

[2] Όπως εξήγήσαμε και στην Ενότητα 2.2.3, ο όρος "baseline" αναφέρεται στην απόσταση που έχουν δύο κεραίες -μέρη του ευρύτερου συστήματος του συμβολόμετρου- μεταξύ τους.

3,7 και 8 αντίστοιχα. Έπειτα από τη φάση της ανακατασκευής των εικόνων, εφαρμόσαμε τη διόρθωση της κύριας beam ("primary beam correction"). Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε για τους κύβους δεδομένων από τους οποίους αφαιρέσαμε την εκπομπή του συνεχούς, μέσω του αλγορίθμου "uvcontsub". Σε κάθε φασματικό παράθυρο χρησιμποποιήθηκαν πολυώνυμα μηδενικής ή πρώτης τάξης για τη μοντελοποίηση του συνεχούς και την αφαίρεσή του από τις εικόνες.

Σε όλες τις μπάντες, η διάταξη των κεραιών της ALMA οδήγησε σε beam με μέγεθος μικρότερο του arcsecond (sub-arcsecond beam). Πιο συγκεκριμένα, η ελλειπτικού σχήματος beam είχε ημιάξονες μεγέθους: $0.51''$ και $0.47''$ και γωνία θέσης PA (position angle): 37° στη μπάντα 3, ημιάξονες μεγέθους: $0.55''$ και $0.44''$ και PA: 60° στη μπάντα 7 και ημιάξονες μεγέθους: $0.38''$ και $0.34''$ και PA: -1° στη μπάντα 8. Σε κοινή κλίμακα pixel $0.08''$ και σε κοινή ανάλυση ταχύτητας $20\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, το επίπεδο του θορύβου βρίσκεται στα 0.45 mJy/beam για το CO(1-0), στα 1.1 mJy/beam για το CO(3-2) κι επίσης στα 1.1 mJy/beam για το CO(4-3). Για τη διερεύνηση των πηλίκων ροής (μέσω των οποίων θα μελετήσουμε τη διέγερση του αερίου όπως θα δούμε παρακάτω) δημιουργήσαμε κι ένα δεύτερο σετ κύβων δεδομένων, μέσω της συνέλιξης (convolution)[3] των δεδομένων σε μία κοινή beam μεγέθους $0.55'' \times 0.55''$ χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο "convolve2d". Σε αυτό το πλήρως ομογενές σετ δεδομένων το επίπεδο του θορύβου βρίσκεται στα: 0.45 mJy/beam, 1.1 mJy/beam, και 1.2 mJy/beam για τα CO(1-0), CO(3-2) και CO(4-3), αντίστοιχα.

Προκειμένου να δημιουργήσουμε κύβους δεδομένων με το μεγαλύτερο δυνατό χρόνο έκθεσης για κάθε γραμμή, ψάξαμε για επιπλέον δεδομένα για το CO από αρχειοθετημένες παρατηρήσεις στις οποίες ο 4C12.50 είχε χρησιμοποιηθεί ως βαθμονομητής άλλων αντικειμένων. Πράγματι, η γραμμή CO(1-0) παρατηρήθηκε με 38 κεραίες της ALMA για 13.6 λεπτά ως βαθμονομητής για το πρόγραμμα 2013.1.00976.S. Βαθμονομήσαμε το συγκεκριμένο σετ μετρήσεων χρησιμοποιώντας τους αλγόριθμους βαθμονόμησης της έκδοσης 4.7.0 της CASA κι έπειτα, συγχωνεύσαμε το -πλεον- βαθμονομημένο σετ μετρήσεων με τα δικά μας αρχικά δεδομένα χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο "concat". Κατ' αυτόν τον τρόπο, δημιουργήσαμε έναν κύβο με συνολικό χρόνο έκθεσης στην πηγή ∼40 λεπτά. Για σκοπούς σύγκρισης, επιλέξαμε την κοινή κλίμακα pixel των $0.08''$ και (κοινή) beam μεγέθους: $1.22'' \times 0.85''$ σε PA: -43°. Το επίπεδο του θορύβου σε αυτόν τον CO(1-0) κύβο φτάνει σε επίπεδο 0.18 mJy/beam σε φασματική ανάλυση $100\,\mathrm{km\,s^{-1}}$. Αντίστοιχα, η γραμμή CO(3-2) είχε παρατηρηθεί με 27 κεραίες της ALMA για 5.8 λεπτά ως βαθμονομητής για το πρόγραμμα 2012.1.00797.S. Βαθμονομήσαμε τα δεδομένα χρησιμοποιώντας την έκδοση 4.1 της CASA και εν συνεχεία, τα συγχωνεύσαμε με τα δικά μας δεδομένα χρησιμοποιώντας την έκδοση 4.6.0 της CASA. Όπως και για τη γραμμή

[3] Η συνέλιξη είναι μία μαθηματική πράξη από το πεδίο της Συναρτησιακής Ανάλυσης, που ορίζεται στο χώρο των ολοκληρώσιμων συναρτήσεων, μεταξύ δύο συναρτήσεων (έστω f και g) για την παραγωγή μίας τρίτης συνάρτησης ($f * g$). Ορίζεται ως το ολοκλήρωμα του γινομένου των δύο αρχικών συναρτήσεων έπειτα από αλλαγή του προσήμου του ορίσματος και μετατόπισης μίας εκ των δύο, δηλαδή: ($f * g$)=$\int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t-\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} f(t-\tau)g(\tau)d\tau$. Η συνέλιξη είναι μία διαδικασία ιδιαίτερα σημαντική κατά την ανάλυση σήματος. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα χρησιμοποιούμε το διεθνή όρο "**convolution**" όταν αναφερόμαστε στη συνέλιξη.

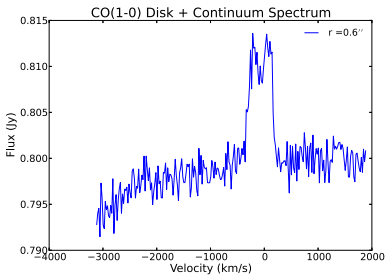
CO(1-0) υιοθετήσαμε την κοική κλίμακα pixel των 0.08′′ για συγκριτικούς σκοπούς. Η κοινή beam έχει μέγεθος: 0.83′′ × 0.53′′ σε PA: -59°. Το επίπεδο του θορύβου σε αυτόν τον CO(3-2) κύβο φτάνει σε επίπεδο 1.2 mJy/beam σε φασματική ανάλυση 20 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ και 0.53 mJy/beam σε φασματική ανάλυση 100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$. Για τη γραμμή CO(4-3)δε βρέθηκαν επιπλέον δεδομένα. Από εδώ και στο εξής, μέσα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θα αναφερόμαστε σε αυτούς τους συνολικούς κύβους με τους μεγάλους χρόνους έκθεσης ως «κύβους χαμηλής χωρικής ανάλυσης». Αντίστοιχα, όταν αναφερόμαστε στους αρχικούς κύβους που περιλαμβάνουν μόνο τα δεδομένα του προγράμματος 2013.1.00180.S θα χρησιμοποιούμε τον όρο «κύβοι υψηλής χωρικής ανάλυσης».

Κεφάλαιο 4

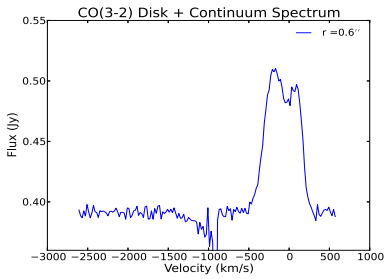
Αποτελέσματα

4.1 Η Ροή Ακτινοβολίας των Γραμμών Εκπομπής

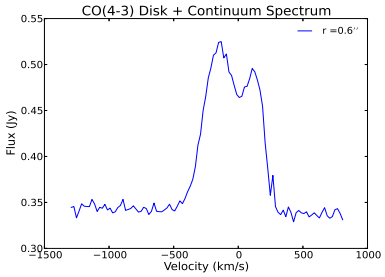
Τα φάσματα όλων των γραμμών που ανιχνεύθηκαν μέσω της ALMA παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1. Εικόνες της εκπομπής των γραμμών που ανιχνεύθηκαν με την ALMA και του συνεχούς παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2.



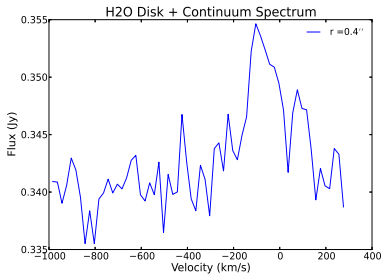
(α′) CO(1-0) και συνεχές



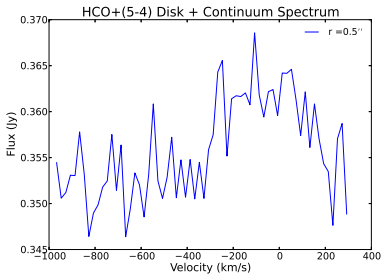
(β′) CO(3-2) και συνεχές



(γ′) CO(4-3) και συνεχές

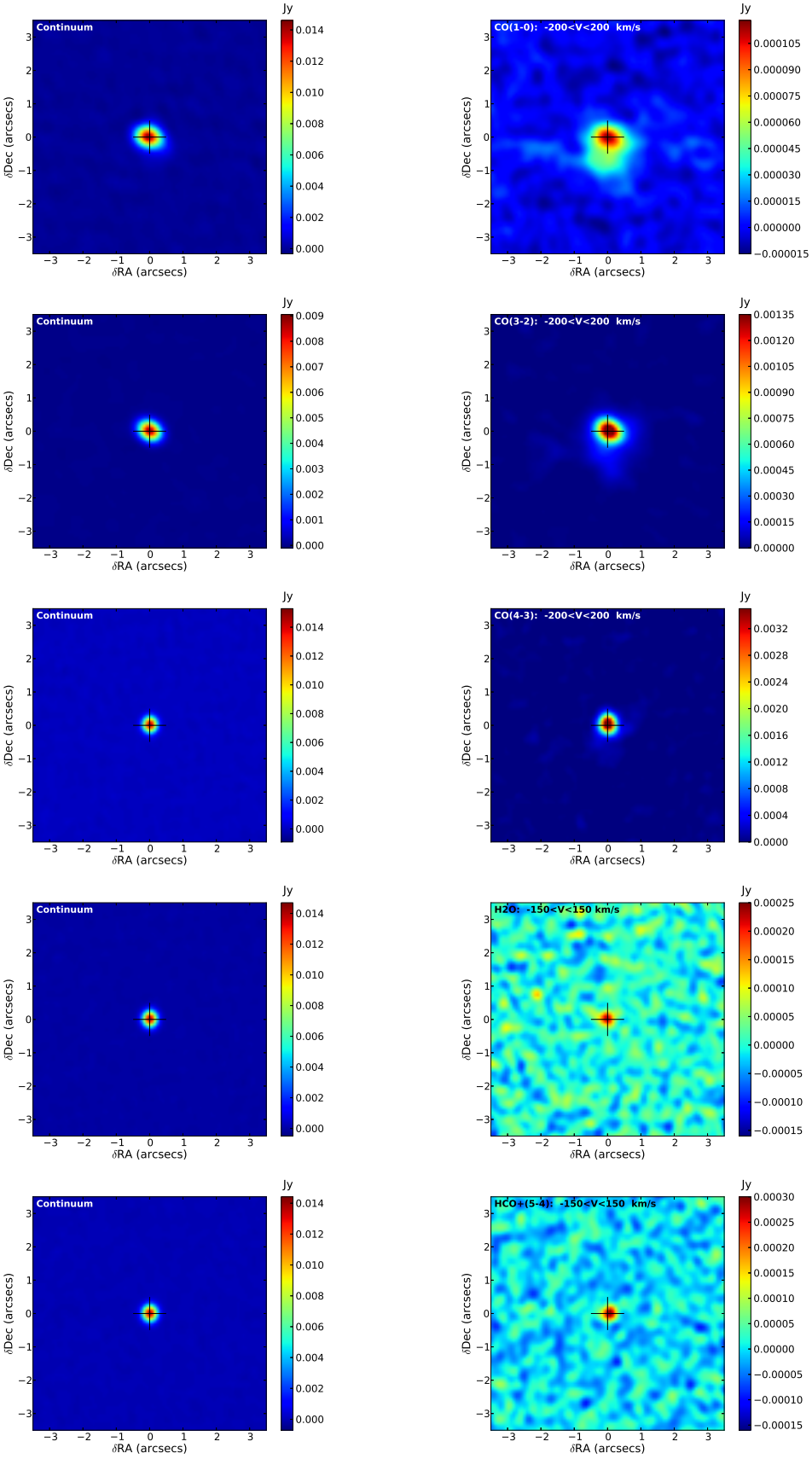


(δ′) H_2O και συνεχές



(ε′) HCO+(5-4) και συνεχές

Σχήμα 4.1: Χωρικά ολοκληρωμένα φάσματα του δίσκου αερίου του κύριου πυρήνα του συστήματος 4C12.50. Τα φάσματα έχουν εξαχθεί εντός ακτίνας r (η τιμή της ακτίνας r φαίνεται πάνω σε έκαστο φάσμα) από το κεντρικό pixel: (101,101), στο οποίο παρατηρείται η μέγιστη εκπομπή του συνεχούς.



Σχήμα 4.2: Εικόνες της εκπομπής των γραμμών του μοριακού αερίου και του συνεχούς από τα δεδομένα της ALMA. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3. ***Αριστερά***: Εκπομπή του συνεχούς. ***Δεξιά***: Εκπομπή των γραμμών. Οι εικόνες δημιουργήθηκαν από κανάλια χωρίς εκπομπή συνεχούς εντός ± 200 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ από τα κέντρα των γραμμών του CO και εντός ± 150 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ από τα κέντρα των γραμμών του H_2O και του HCO+(5-4)ij

Από τις γραμμές CO(1-0) , CO(3-2) και CO(4-3) που ανιχνεύθηκαν, η μέση ερυθρομετατόπιση (redshift) του 4C12.50 είναι ίση με: $z = 0.1219 \pm 0.001$. Σε αυτήν την τιμή του z, $1''$ αντιστοιχεί σε 2.2kpc. Οι ολοκληρωμένες ροές για τις γραμμές του CO, όπως προκύπτουν από τους «βαθείς/χαμηλής χωρικής ανάλυσης» κύβους δεδομένων είναι: 15.8($\pm$0.4) Jy km s^{-1} και 57.9($\pm$0.3) Jy km s^{-1} για το CO(1-0) και το CO(3-2) αντίστοιχα. Οι ολοκληρωμένες ροές για τις γραμμές του CO, όπως προκύπτουν από τους «ρηχούς/υψηλής χωρικής ανάλυσης» κύβους δεδομένων είναι: 8.2($\pm$0.3) Jy km s^{-1} 57.9($\pm$0.4) Jy km s^{-1} και 65.3($\pm$0.5) Jy km s^{-1} για το CO(1-0) CO(3-2) και το CO(4-3) αντίστοιχα. Για συγκριτικούς σκοπούς αξίζει να αναφερθεί ότι η ροή της γραμμής CO(3-2) βρίσκεται εντός του σφάλματος της αντίστοιχης τιμής που είχε υπολογιστεί από δεδομένα του 30m ραδιοτηλεσκοπίου του IRAM και είχε βρεθεί ίση με 50($\pm$8)Jy km s^{-1} (Dasyra and Combes, 2012). Αυτό δείχνει ότι οι γραμμές του CO με υψηλή περιστροφική διέγερση (δηλαδή μεγάλους αριθμούς τροχιακής στροφορμής J, βλ. Ενότητα 2.1.3) έχουν μία επαρκή χωρική έκταση, ώστε να μπορούν να παρατηρηθούν πλήρως από την επιλεγμένη διάταξη των κεραιών στην ALMA. Προηγούμενες συμβολομετρικές παρατηρήσεις της γραμμής CO(1-0) με τη συστοιχία ραδιοτηλεσκοπίων Plateau de Bure (PdB) του IRAM, με μέγεθος beam[1]: 4.0$''$ $\times$ 3.8$''$ έδωσαν ροή 18.2($\pm$1.5) Jy km s^{-1} (Dasyra et al., 2014). Οι δικές μας μετρήσεις της ροής από το «βαθύ» κύβο με beam: 1.22$''$ $\times$ 0.85$''$ βρίσκονται εντός του σφάλματος των προαναφερθέντων δεδομένων του PdB. Αντιθέτως, οι μετρήσεις μας από το «ρηχό» κύβο (πρόγραμμα: 2013.1.00180.S) με beam: 0.55$''$ $\times$ 0.44$''$ είχαν περίπου τη μισή ροή, κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι η υπόλοιπη ροή ακτινοβολίας από την εκπομπή του CO(1-0) δε συλλέχθηκε από την επιλεχθείσα διαμόρφωση των κεραιών της ALMA κατά τη λήψη των παρατηρήσεων για το CO(1-0)Βασιζόμενοι στα δεδομένα του «βαθύ» CO(1-0) κύβου, όπου δεν υπάρχει απώλεια ροής, από τη ροή ακτινοβολίας υπολογίζουμε τη μάζα του γαλαξία. Υπενθυμίζουμε τη σχέση 2.3 για τον υπολογισμό της μάζας που περιγράψαμε στην Ενότητα 2.1.4:

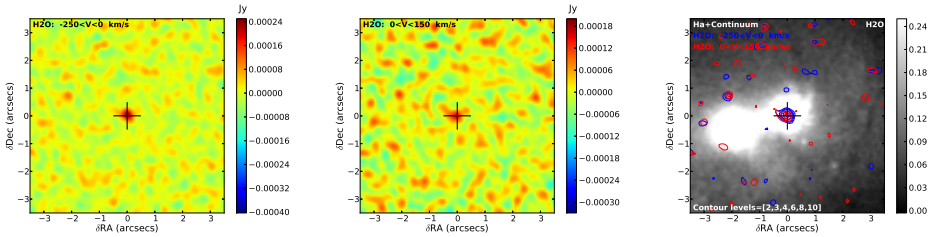
$$M(H_2) = 3.25 \cdot 10^7 \cdot \alpha_{CO(1-0)} S_{CO(1-0)} \Delta V \frac{D_L^2}{\nu_{obs}^2 (1+z)^3} [\, M_\odot]$$

Μέσα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα υϊοθετήσουμε τιμή για το $\alpha_{CO(1-0)}$ ίση με $0.8[\, M_\odot / K$ km s$^{-1} pc^2]$, ώστε να είμαστε συνεπείς με τη βιβλιογραφία που υποθέτει μικρότερο παράγοντα $\alpha_{CO(1-0)}$ για τους ULIRGs[2] -όπως είναι και ο υπό μελέτη γαλαξίας 4C12.50- συγκριτικά με αυτήν για το Γαλαξία (Downes and Solomon, 1998). Επίσης, θα υϊοθετήσουμε το μοντέλο της ΛCMD Κοσμολογίας:
$H_0 = 70$ km s$^{-1} Mpc^{-1}$, $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7) \Rightarrow D_L \sim 569\ [Mpc]$. Η τιμή της παρατηρούμενης συχνότητας για το CO(1-0) ειναι ν_{obs}=102.921 $[GHz]$. Σύμφωνα με τα παραπάνω η εκτιμώμενη μάζα του γαλαξία είναι περίπου ίση με $9.7(\pm 0.2) \times 10^9\, M_\odot$.

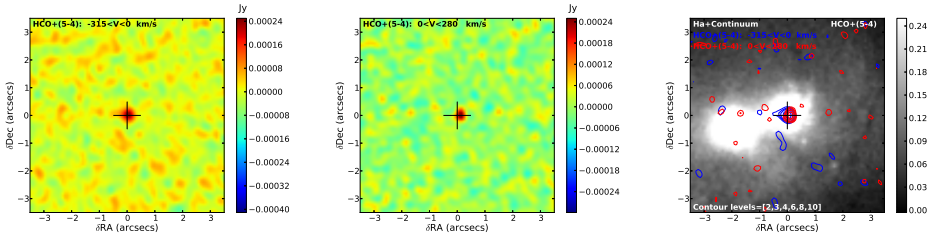
Επιπλέον, οι γραμμές HCO+(5-4) και H_2O σε σύστημα ηρεμίας 448.00108 $[GHz]$ ανιχνεύθηκαν στη μπάντα 8. Η εκπομπή στο HCO+(5-4) και στο H_2O είναι δυσδιάκριτη (unresolved) και επικεντρωμένη στον κύριο πυρήνα. Μεταξύ των θετικών

[1]βλ. Ενότητα 2.2
[2]ULIRGs = Ultraluminous Infrared Galaxies

και των αρνητικών ταχυτήτων υπάρχουν μικρές αποκλίσεις σε αντίθετες κατευθύνσεις ως προς το κέντρο όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.3 και 4.4. Το νερό είναι ανιχνευτής ωστικών κυμάτων (shock tracer), ενώ το HCO+(5-4) είναι ένα ιόν το οποίο ιχνηθετεί την ακτινοβολία του AGN (AGN tracer). Στα Σχήματα 4.3 και 4.4. παρατηρούμε ότι το νερό για θετικές ταχύτητες εκπέμπει ελαφρώς νοτιοανατολικά ως προς τη θέση του ραδιοφωνικού πυρήνα, ενώ η εκπομπή από τις θετικές ταχύτητες του HCO+(5-4) βρίσκεται δυτικά του ραδιοφωνικού πυρήνα. Οι ροές των γραμμών HCO+(5-4) και H_2O είναι 2.70($\pm$0.16) Jy km s^{-1}και 1.65($\pm$0.04) Jy km s^{-1}, αντίστοιχα. Η γραμμή του HCS+(3-2) δεν ανιχνεύθηκε στη μπάντα 3.



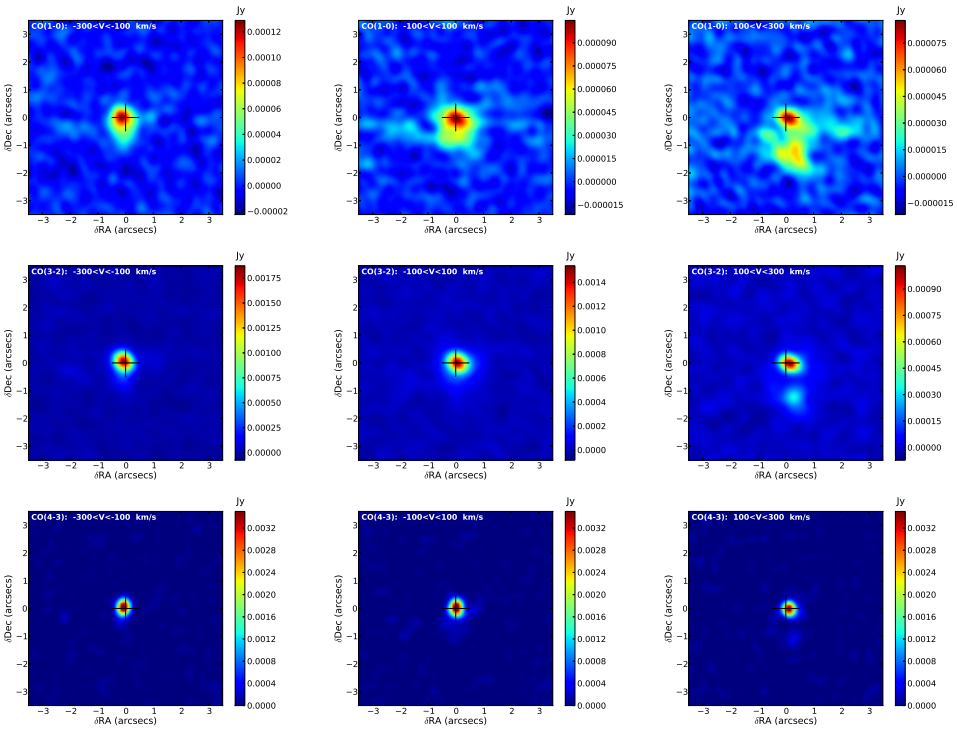
Σχήμα 4.3: Εικόνες της εκπομπής της γραμμής του H_2O από τα δεδομένα της ALMA και τα αντίστοιχα contours της εκπομπής σε ένα εύρος ταχυτήτων ενδεικτικό των ταχυτήτων περιστροφής του γαλαξία. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.
Αριστερά: Ανιχνεύσεις στο εύρος ταχυτήτων: -250 km s^{-1} έως 0 km s^{-1} . ***Κέντρο***: Ανιχνεύσεις στο εύρος ταχυτήτων: 0 km s^{-1} έως 150 km s^{-1} . ***Δεξιά***: H_2O contours πάνω στην οπτική εικόνα της εκπομπής H_α + συνεχούς.



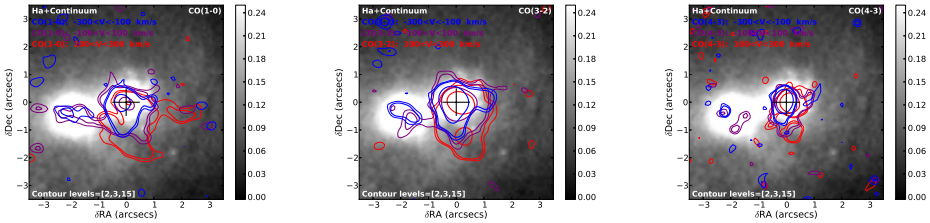
Σχήμα 4.4: Εικόνες της εκπομπής της γραμμής του HCO+(5-4) από τα δεδομένα της ALMA και τα αντίστοιχα contours της εκπομπής σε ένα εύρος ταχυτήτων ενδεικτικό των ταχυτήτων περιστροφής του γαλαξία. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.
Αριστερά: Ανιχνεύσεις στο εύρος ταχυτήτων: -315 km s^{-1} έως 0 km s^{-1} . ***Κέντρο***: Ανιχνεύσεις στο εύρος ταχυτήτων: 0 km s^{-1} έως 280 km s^{-1} . ***Δεξιά***: HCO+(5-4) contours πάνω στην οπτική εικόνα της εκπομπής H_α + συνεχούς.

4.2 Ο Δίσκος του Μοριακού Αερίου από Παρατηρήσεις στο CO

Οι γραμμές εκπομπής CO αποκαλύπτουν αρκετές δομές στο χώρο, καθώς και μία γενική εκπομπή στο CO, της οποίας η έκταση ξεπερνά τα $\sim 12 \pm 2$ kpc κατά μήκος του άξονα «ανατολή-δύση». Μία ιδιαίτερα εμφανής δομή είναι αυτή του δίσκου μοριακού αερίου, η οποία ανιχνεύεται γύρω από τον κύριο πυρήνα, από τον οποίο εκτοξεύεται ο ραδιο-πίδακας. Η εκπομπή του δίσκου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2 για ταχύτητες κοντά σε αυτές του συστήματος ηρεμίας του και στα Σχήματα 4.5, 4.6 για διαφορετικά εύρη ταχυτήτων. Συγκριτικά με την εκπομπή της γραμμής CO(1-0) η εκπομπή των γραμμών CO(3-2) και CO(4-3) είναι πιο εντοπισμένη στον πυρήνα (Σχήμα 4.5). Η έκταση του CO σε σύγκριση με την έκταση του υδρογόνου και των άστρων φαίνεται στο Σχήμα 4.6, όπου σχεδιάζονται τα contours της εκπομπής του CO πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής του H_α και του συνεχούς.



Σχήμα 4.5: Ανιχνεύσεις CO(1-0), CO(3-2) και CO(4-3)σε εύρη ταχυτήτων: ***Αριστερά***: -300 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως -100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ ***Κέντρο***: -100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως 100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ και ***Δεξιά***: 100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως 300 $\mathrm{km\,s^{-1}}$. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.

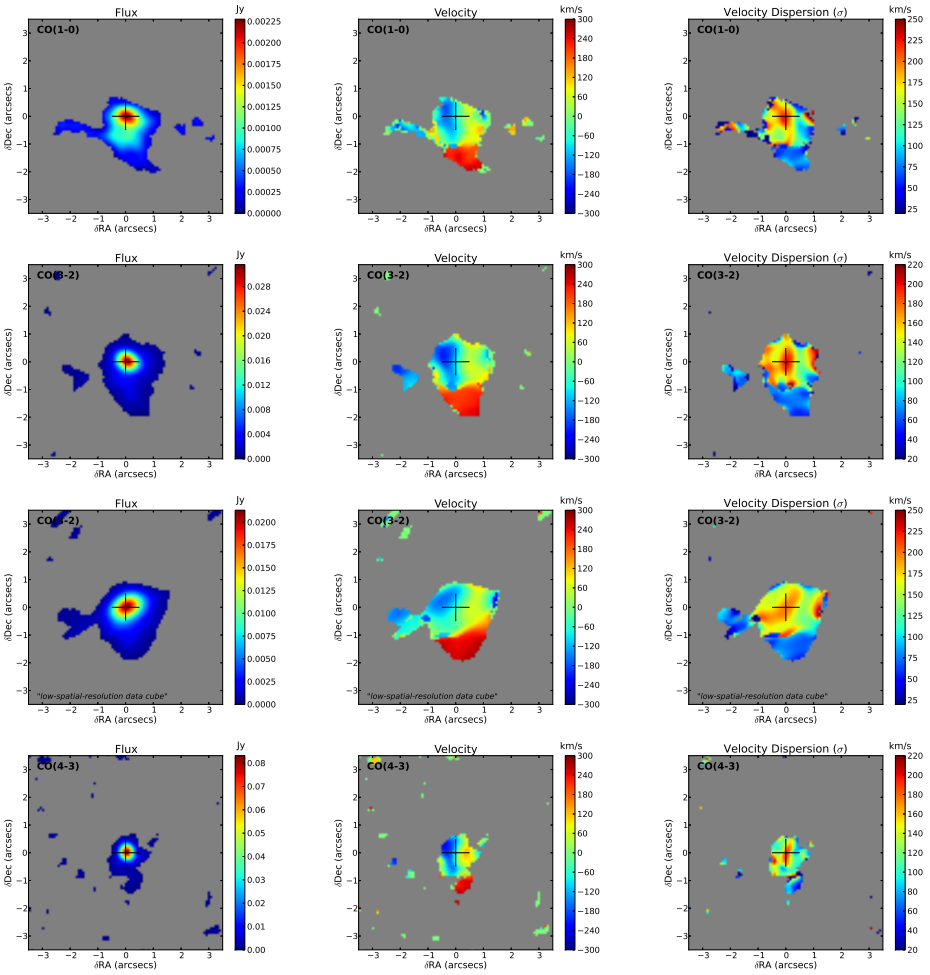


Σχήμα 4.6: Ανιχνεύσεις CO(1-0), CO(3-2) και CO(4-3)σε εύρη ταχυτήτων: -300 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως -100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ -100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως 100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ και 100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως 300 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής του H_α και του συνεχούς. Τα contours δείχνουν την έκταση του μοριακού αερίου με ταχύτητες κοντά στην ακτινική ταχύτητα περιστροφής του γαλαξία. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.
Αριστερά: CO(1-0) . ***Κέντρο***: CO(3-2) . ***Δεξιά***: CO(4-3) .

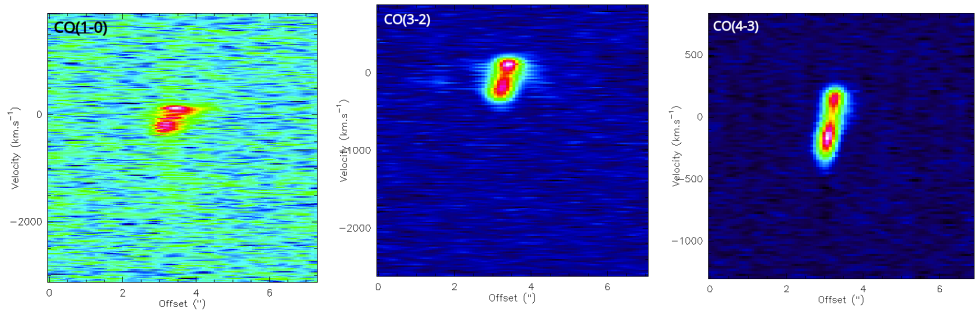
Σε όλες τις γραμμές του CO παρατηρείται μία προοδευτική μετάβαση του επίκεντρου του δίσκου από τα βόρειοανατολικά προς τα νοτιοδυτικά με αύξουσα ταχύτητα (από τα αρνητικά στα θετικά). Η περιστροφή του αέριου δίσκου γίνεται κατά την ορθή φορά (αριστερόστροφα ή αλλιώς αντίστροφα της φοράς των δεικτών του ρολογιού) κάτι το οποίο αποκαλύπτεται καλύτερα από τους χάρτες ροής, ταχύτητας και διασποράς της ταχύτητας (σ) που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.7. Οι συγκεκριμένοι χάρτες δημιουργήθηκαν από την εφαρμογή μίας συνάρτησης Gauss, που μοντελοποιεί την εκπομπή των γραμμών CO, σε κάθε χωρικό pixel των δεδομένων ALMA. Η γραμμική ταχύτητα του γαλαξία είναι περίπου 150-200 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ (βέβαια, οι τιμές αυτές εξαρτώνται από τη γραμμή που χρησιμοποιείται για να διερευνήσουμε την κινηματική του γαλαξία, αλλά και την πλευρά του γαλαξία που εξετάζουμε). Παρόλο που από τους προαναφερθέντες χάρτες η περιστροφή του μοριακού αερίου του κύριου πυρήνα προκύπτει ότι γίνεται κατά την ορθή φορά, σε μεγαλύτερες αποστάσεις υπάρχουν ενδείξεις δεξιόστροφης περιστροφής (κατά την ίδια φορά με αυτή των δεικτών του ρολογιού). Για παράδειγμα, μία "redshifted"[3] δομή που ανιχνεύεται νότια του κύριου πυρήνα (CO(1-0) contours στο εύρος ταχυτήτων: 100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως 300 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ στο Σχήμα 4.6) και μία "blueshited" δομή που ανιχνεύεται δυτικά του κύριου πυρήνα (CO(4-3) contours στο εύρος ταχυτήτων: -300 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως -100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ στο Σχήμα 4.6) θα μπορούσαν να περιστρέφονται δεξιόστροφα ή να είναι παλιρροϊκές ουρές (tidal tails) λόγω της συγχώνευσης των γαλαξιακών πυρήνων του συστήματος. Ένα διαφορετικό σενάριο είναι και το εξής: οι δομές αυτές θα μπορούσαν να έχουν επιταχυνθεί/διεγερθεί εξαιτίας του ραδιο-πίδακα ή να αποτελούσαν αρχικά μία δομή, στην οποία προσέκρουσε ο πίδακας και την έστρεψε προς δύο διαφορετικές κατευθύνσεις. Η περιστροφή των αστεριών είναι δεξιόστροφη όπως υποδεικνύεται από μικρές «σπείρες» με αστέρια δυτικά του κύριου πυρήνα (βλ. αντίστοιχη φωτογραφία εκπομπής του συνεχούς του Σχήματος 1.3). Επομένως υπάρχουν πιθανά

[3]"Redshifted"=Μετατοπισμένος προς το ερυθρό. Χρησιμοποιούμε το συγκεκριμένο όρο που συνδέεται με το φαινόμενο Doppler για δομές που ανιχνεύονται σε θετικές ταχύτητες, δηλαδή το αντίστοιχο αέριο απομακρύνεται από τον παρατηρητή. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα χρησιμοποιούμε συχνά τους διεθνείς όρους "redshifted" και "blueshited" όταν αναφερόμαστε στις δομές που ανιχνεύουμε

στοιχεία «αντίστροφης περιστροφής» (“counter-rotation”) στις κεντρικές περιοχές του γαλαξία. Αυτή η «αντίστροφη περιστροφή» δε φανερώνεται περαιτέρω από διαγράμματα θέσης-ταχύτητας κατά μήκος του κύριου άξονα (Σχήμα 4.8), καθώς ο δίσκος είναι σχετικά μικρός. Ο μεγάλος άξονας του αέριου δίσκου, όπως υπολογίστηκε από τις 3 γραμμές εκπομπής του CO για τις οποίες συλλέξαμε δεδομένα, έχει γωνία θέσης (position angle) ίση με $62^{\circ} \pm 5^{\circ}$.



Σχήμα 4.7: Χάρτες ροής, ταχύτητας και διασποράς ταχύτητας (σ) για το CO(1-0), το CO(3-2) και το CO(4-3) για pixels, των οποίων η ροή υπερβαίνει τις 3 φορές το θόρυβο (noise root mean square). Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.
Αριστερά: Ροή. ***Κέντρο***: Ταχύτητα. ***Δεξιά***: Διασπορά της Ταχύτητας.



Σχήμα 4.8: Διαγράμματα θέσης-ταχύτητας κατά μήκος του κύριου άξονα του δίσκου μοριακού αερίου.
Αριστερά: CO(1-0) . ***Κέντρο***: CO(3-2) . ***Δεξιά***: CO(4-3) .

Γύρω από το δευτερεύοντα πυρήνα του συστήματος ανιχνεύεται μέρος μίας ακόμη αέριας δομής, πιθανώς δίσκος. Ο δευτερεύων πυρήνας ανιχνεύετα κι εκείνος στα οπτικά μήκη κύματος και βρίσκεται σε απόσταση[4] περίπου 2$''$ από το ραδιοφωνικό πυρήνα (Dasyra et al., 2014). Γενικά, η εκπομπή του CO από το δευτερεύοντα πυρήνα γίνεται σε αρνητικές ταχύτητες ("blueshifted"). Επίσης, ανιχνεύεται μία «γέφυρα» αερίου σε αρνητικές ταχύτητες, η οποία φαίνεται να ενώνει το δευτερεύοντα πυρήνα με τον κύριο. Η συγκεκριμένη δομή ανιχνεύεται σε εύρος ταχυτήτων: -300 km s^{-1} έως -100 km s^{-1} και πιθανώς αποκαλύπτει μία διακριτή ροή (stream) μοριακού αερίου (Σχήμα 4.6). Ο λόγος της ροής του CO του δευτερεύοντα πυρήνα προς του κύριου είναι σημαντικά χαμηλότερος απ' ότι ο αντίστοιχος λόγος ροών του [O III] στο οπτικό. Μία πιθανή αιτία γι αυτό ενδεχομένως είναι η ροή μοριακού αερίου από το δευτερευοντα πυρήνα προς τον κύριο, παραδείγματος χάρη μέσω streams όπως αυτό που περιγράψαμε. Επιπλέον, στο Κεφάλαιο 1 συζητήσαμε για την εκπομπή των αστεριών των δύο πυρήνων και παρατηρήσαμε ότι ο δευτερεύων πυρήνας έχει ελαφρώς εντονότερη εκπομπή αστεριών (συνεχές) απ' ότι ο κύριος (βλ. Σχήμα 1.3), επομένως το σύστημα πιθανώς ξεκίνησε με τη συγχώνευση πυρήνων παρόμοιας αστρικής μάζας. Ένα τέτοιο σενάριο θα μπορούσε να ερμηνεύσει την αντίστροφη περιστροφή του αερίου των κεντρικών περιοχών του κύριου πυρήνα συγριτικά με τις εξωτερικές περιοχές του, για την οποία συζητήσαμε παραπάνω. Πιο αναλυτικά, οι εσωτερικές περιοχές ενός αέριου δίσκου (έστω πυρήνας 1) μπορεί να περιστρέφονται αντίστροφα από τις εξωτερικές περιοχές του (δηλαδή να παρατηρείται του φαινόμενο της "counter-rotation"), εάν αυτός ο δίσκος -που αρχικά περιστρεφόνταν με τη φορά που πλέον διατηρούν οι εξωτερικές περιοχές του- μπήκε σε διαδικασία συγχώνευσης ("merger"), με κάποιον γαλαξία (έστω πυρήνας 2) ο οποίος περιστρεφόταν αντίστροφα και διοχέτευσε μεγαλύτερο ποσό αερίου στον πυρήνα 1, απ' ότι ο πυρήνας 1 είχε αρχικά. Το αέριο αυτό έλκεται από την κεντρική περιοχή του πυρήνα 1 κι εφόσον είναι περισσότερο από αυτό που υπήρχε αρχικά εκεί, δύναται να υπερτερήσει κινηματικά και να αλλάξει την περιστροφή των κεντρικών περιοχών του πυρήνα 1, προσδίδοντάς τους την περιστροφή που είχε, δηλαδή αυτή του πυρήνα 2 (Corsini, 2014). Από το χάρτη ταχύτητας για το CO(3-2) (βλ. Σχήμα 4.7, π.χ. 4η σειρά) συμπεραίνουμε ότι περιστροφή του δευτερεύοντα πυρήνα κατά την ορθή φορά (από τα βορειοανατολικά προς τα

[4]η απόσταση αυτή αναφέρεται στην προβαλλόμενη απόσταση, όπως φαίνεται στην 2D εικόνα

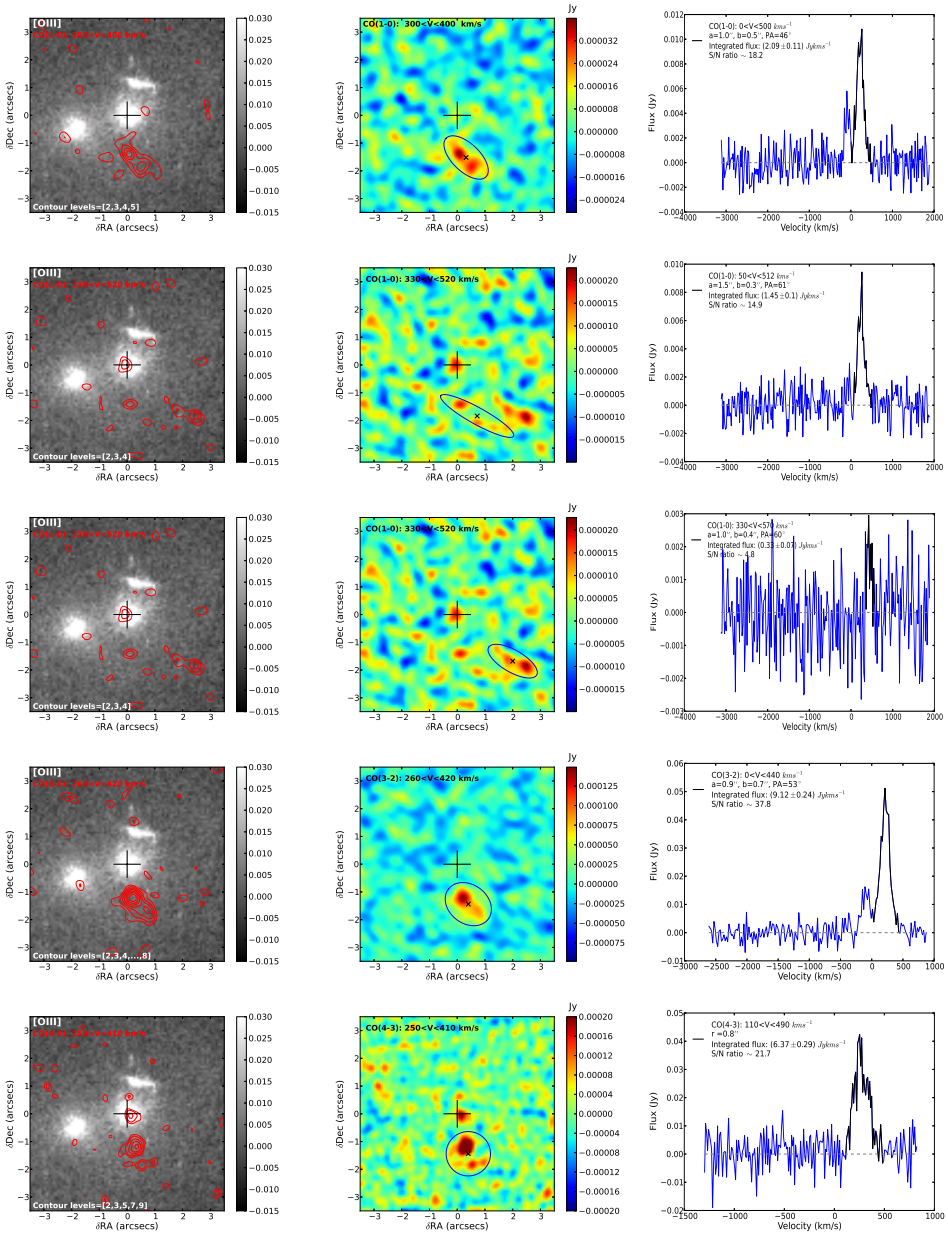
νοτιοδυτικά) είναι πιθανή. Επομένως, το παραπάνω σενάριο θα μπορούσε να υποστηριχθεί. Σε μία τέτοια περίπτωση, η αλλαγή της φοράς περιστροφής του αερίου του κύριου πυρήνα από αριστερόστροφη σε δεξιόστροφη συμβαίνει εντός ακτίνας ∼1 kpc από το κέντρο του. Τέλος, τρεις επιμήκεις δομές, οι οποίες διακρίνονται ξεκάθαρα γύρω από τον κύριο πυρήνα (Σχήμα 4.6), είναι οι σπείρες του αρχικού δίσκου του γαλαξία, οι οποίες διατηρούν τη δεξιόστροφη περιστροφή τους. Μία σπείρα ανιχνεύεται στα νότια του κύριου πυρήνα -κυρίως- σε θετικές ταχύτητες, μία στα δυτικά σε θετικές ταχύτητες και μία στα βορειοδυτικά σε αρνητικές ταχύτητες (είναι καλύτερα ορατή στο εύρος ταχυτήτων -300 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως -100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ στα δεδομένα του CO(4-3)).

4.3 Άλλες Δομές και Υποψήφιες Ανιχνεύσεις Ανέμου

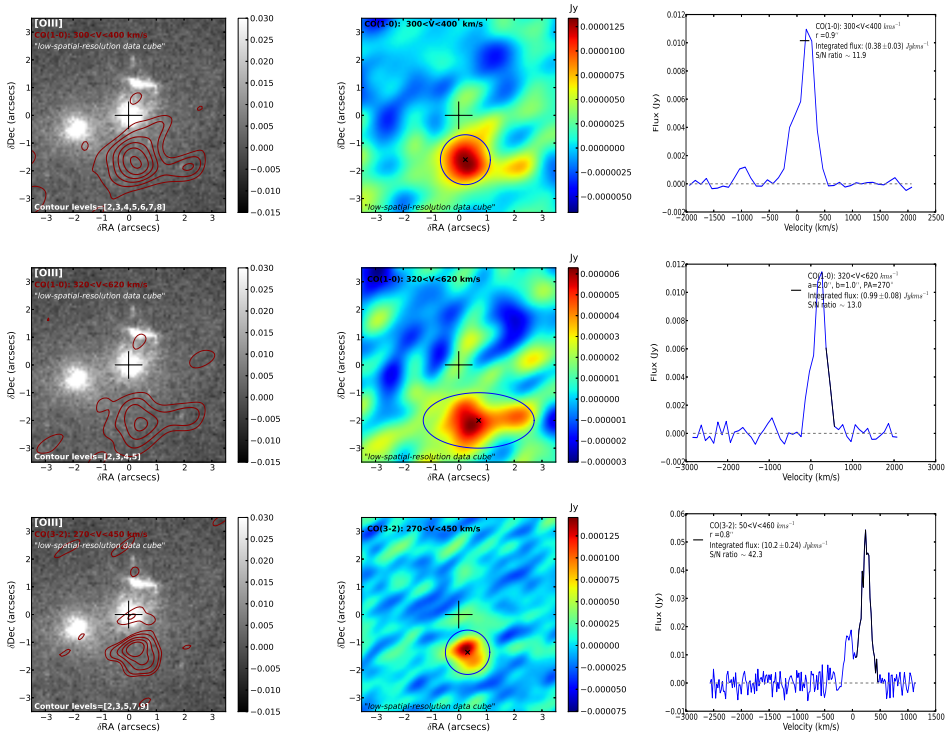
4.3.1 Περιοχή Νότια του Κύριου Πυρήνα

Η πιο λαμπρή ανίχνευση στα δεδομένα μας, εκτός της περιοχής του κύριου πυρήνα, είναι η "redshifted" δομή για την οποία συζητήσαμε στην προηγούμενη Ενότητα. Η συγκεκριμένη δομή ανιχνεύεται σε όλες τις γραμμές του CO (CO(1-0) , CO(3-2) , CO(4-3)). Η εκπομπή της συγκεκριμένης δομής είναι τόσο λαμπρή που κυριαρχεί στην κινηματική της περιοχής: έχει χαμηλή διασπορά στην ταχύτητα, ενδεικτική αυτής που υπάρχει στις σπείρες: 60-80 $\mathrm{km\,s^{-1}}$, ενώ η διασπορά στις ταχύτητες για το δίσκο ξεπερνά τα 120 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ (Σχήμα4.7). Η μέση ταχύτητα της δομής είναι υψηλή ∼200-300 $\mathrm{km\,s^{-1}}$. Τα νέφη που αποτελούν τη συγκεκριμένη δομή βρίσκονται: κοντά στον πυρήνα με ταχύτητες ∼ 300 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ και πιο μακριά, στα νοτιοδυτικά του κύριου πυρήνα με ταχύτητες ∼ 400 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ (Σχήμα 4.9). Στην προηγούμενη Ενότητα 4.2 αναφερθήκαμε στο σενάριο της «αντίστροφης περιστροφής» ("counter-rotation"), στο οποίο ερμηνεύσαμε τη συγκεκριμένη δομή ως σπείρα του αρχικού δίσκου του γαλαξία που διατηρεί την αρχική στροφορμή της. Ένα διαφορετικό σενάριο είναι η συγκεκριμένη ανίχνευση να αποτελεί μία «παλιρροϊκή ουρά» ("tidal tail") εξαιτίας των δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των δύο γαλαξιών λόγω της συγχώνευσής τους. Σε καθένα από τα δύο αυτά σενάρια, η δομή είναι πιθανό να συνδέεται με μία αντίστοιχη μεγαλύτερη δομή που ανιχνεύθηκε από τους (Dasyra et al., 2014) σε κλίμακα >4 kpc.

Όπως συζητήσαμε και στην προηγούμενη ενότητα, η ανίχνευση στην περιοχή νότια του κύριου πυρήνα γίνεται κυρίως σε θετικές ταχύτητες. Όλες οι πληροφορίες για τη συγκεκριμένη ανίχνευση σε θετικές ταχύτητες παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.9. Επίσης, στο Σχήμα 4.10 δίνονται οι πληροφορίες της ίδιας ανίχνευσης από τα δεδομένα των «βαθέων» κύβων δεδομένων χαμηλής χωρικής ανάλυσης. Σε αυτούς τους κύβους ο χρόνος έκθεσης στην πηγή είναι μεγαλύτερος και γι αυτό χρησιμοποιούμε τα δεδομένα τους, προκειμένου να επιβεβαιώσουμε την ανίχνευση δομών που γίνεται από τα δεδομένα των «ρηχών» κύβων υψηλής χωρικής ανάλυσης.



Σχήμα 4.9: Ανίχνευση λαμπρής δομής νότια του κύριου/δυτικού πυρήνα σε θετικές ταχύτητες, μέσα στο εύρος των γραμμικών ταχυτήτων του δίσκου αερίου. Οι ανιχνεύσεις έγιναν από τα δεδομενα των «ρηχών»/υψηλής χωρικής ανάλυσης κύβων: CO(1-0), CO(3-2) και CO(4-3) . Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.

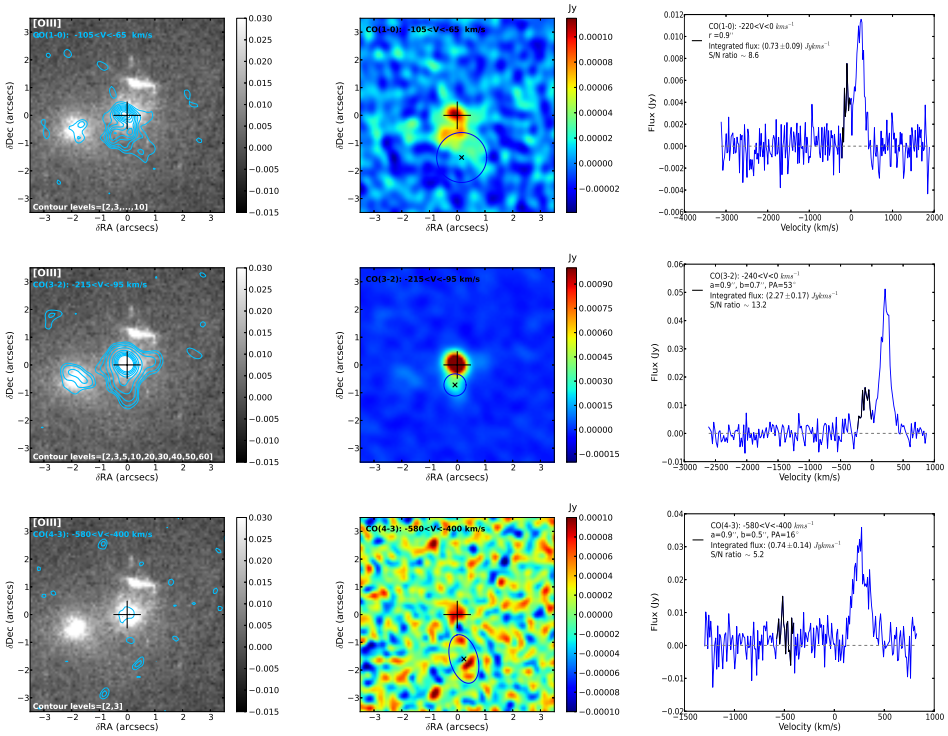


Σχήμα 4.10: Ανίχνευση λαμπρής δομής νότια του κύριου/δυτικού πυρήνα σε θετικές ταχύτητες, μέσα στο εύρος των γραμμικών ταχυτήτων του δίσκου αερίου. Οι ανιχνεύσεις έγιναν από τα δεδομενα των «βαθέων»/χαμηλής χωρικής ανάλυσης κύβων: CO(1-0), CO(3-2) και CO(4-3) . Χρησιμοποιούνται ως επιβεβαίωση των ανιχνεύσεων του Σχήματος 4.9. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.

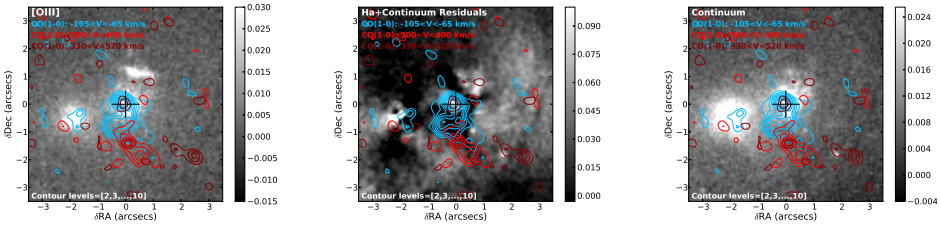
Το CO(1-0) φάσμα της συγκεκριμένης ανίχνευσης (Σχήμα 4.9) αποκαλύπτει, εκτός από την εκπομπή στις θετικές ταχύτητες για την οποία συζητήσαμε, και εκπομπή σε αρνητικές ταχύτητες, η οποία χωρικά συμπίπτει μερικώς με την εκπομπή στις θετικές ταχύτητες σε αυτήν την περιοχή (Σχήμα 4.12). Η ανίχνευση της εκπομπής στις αρνητικές ταχύτητες και το φάσμα της δίνονται στο Σχήμα 4.11. Το σχήμα της είναι ενδεικτικό μίας ακόμη επιμήκους δομής εκτός δυναμικής ισορροπίας με διαφορετικό προσανατολισμό και φορά περιστροφής απ' ότι η αντίστοιχη δομή που ανιχνεύθηκε στις θετικές ταχύτητες. Θα μπορούσε να είναι μία σπείρα ή παλιρροϊκή ουρά του δίσκου του κύριου πυρήνα, η οποία να συνδέει την εσωτερική περιοχή του με την εξωτερική, η οποία περιστρέφεται αντίστροφα, όπως έχουμε αναλύσει. Με μία διαφορετική προσέγγιση, η συγκεκριμένη δομή θα μπορούσε να ερμηνευθεί ως μία ακόμη «γέφυρα» μοριακού αερίου που συνδέει τους δύο πυρήνες. Επίσης, ένα ακόμη πιθανό σενάριο είναι η δομή που ανιχνεύεται στις θετικές ταχύτητες και η δομή που ανιχνεύεται στις αρνητικές ταχύτητες να αποτελούν ανιχνεύσεις δομών που έχουν επιταχυνθεί/διεγερθεί εξαιτίας του ραδιο-πίδακα ή να αποτελούσαν αρχικά μία ενιαία δομή, στην οποία προσέκρουσε ο πίδακας και την έστρεψε προς δύο διαφορετικές κατευθύνσεις.

Το CO(4-3) φάσμα της ίδιας περιοχής (Σχήμα 4.11) μας δίνει μία ένδειξη ότι στη συγκεκριμένη περιοχή θα μπορούσε να υπάρχει εκροή μοριακού αερίου από

τον κύριο πυρήνα, καθώς η ανίχνευση της εκπομπής γίνεται σε σχετικά υψηλές ταχύτητες τόσο αρνητικές: $V_{CO(4-3)}$<-400 km s^{-1} (Σχήμα 4.11) όσο και θετικές: $V_{CO(4-3)}$>250 km s^{-1} (Σχήμα 4.9). Ωστόσο, σε αυτές τις ταχύτητες και στη συγκεκριμένη περιοχή η ανιχνευθείσα δομή δεν είναι δυνατό να διαχωριστεί χωρικά ή φασματοσκοπικά από δομές του δίσκου, όπως σπείρες ή παλιρροϊκές ουρές, των οποίων η ταχύτητα βρίσκεται εντός εύρους ± 500 km s^{-1} .

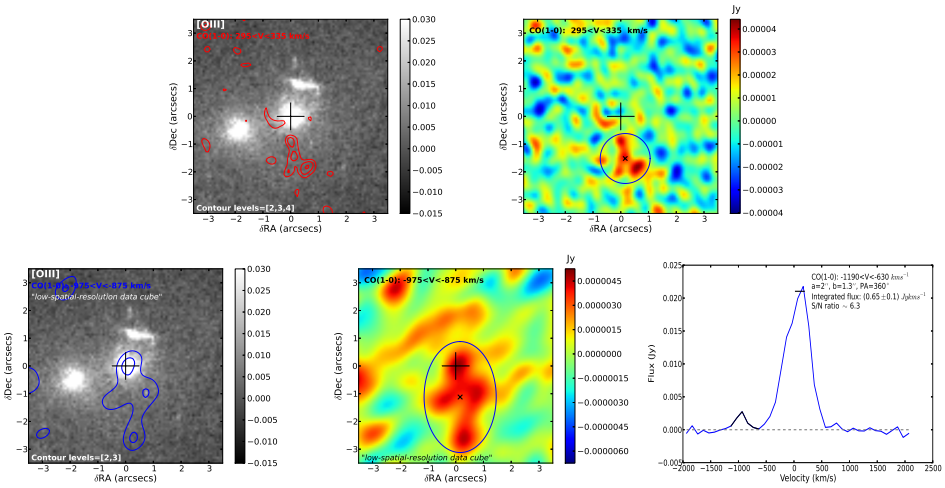


Σχήμα 4.11: Ανίχνευση δομής νότια του κύριου/δυτικού πυρήνα σε αρνητικές ταχύτητες, μέσα στο εύρος των γραμμικών ταχυτήτων του δίσκου αερίου. Οι ανιχνεύσεις έγιναν από τα δεδομενα των «ρηχών»/υψηλής χωρικής ανάλυσης κύβων: CO(1-0), CO(3-2) και CO(4-3) . Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.



Σχήμα 4.12: Ανίχνευση δομών νότια του κύριου πυρήνα σε θετικές και αρνητικές ταχύτητες, μέσα στο εύρος των γραμμικών ταχυτήτων του δίσκου αερίου.Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3. ***Αριστερά***: Contours των ανιχνεύσεων πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής [O III] . ***Κέντρο***: Contours των ανιχνεύσεων πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής H_α + συνεχές από την οποία αφαιρέσαμε το μοντέλο 2 bulges και ενός δίσκου. ***Δεξιά***: Contours των ανιχνεύσεων πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής των αστεριών.

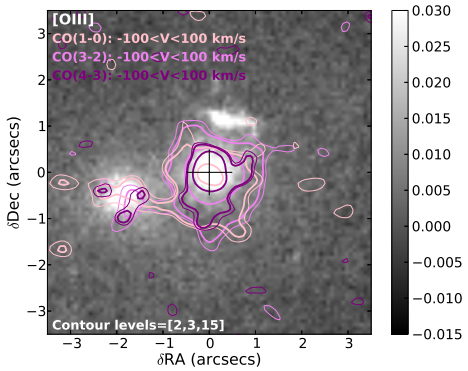
Στα CO(1-0) δεδομένα ανακαλύψαμε μία δομή, η οποία θα μπορούσε να υποδεικνύει την παρουσία μοριακού ανέμου. Από τα δεδομένα του «ρηχού» κύβου αποκαλύφθηκε μία επιμήκης δομή, ένα «νήμα», κατά μήκος του άξονα της ραδιοφωνικής εκπομπής μεγάλης κλίμακας, δηλαδή στη διεύθυνση Βορρά-Νότου, σε θετικές ταχύτητες (Σχήμα 4.13). Από τα δεδομένα του «βαθύ» κύβου του CO(1-0) ανακαλύψαμε ένα αντίστοιχο νήμα σε αρνητικές, όμως, ταχύτητες ∼-900 km s^{-1} (Σχήμα 4.13). Οι ταχύτητες αυτές είναι συνεπείς με τις ταχύτητες ενός μοριακού ανέμου.



Σχήμα 4.13: Ανιχνεύσεις πιθανού ανέμου κατά μήκος του άξονα του πίδακα της μεγάλης έκτασης ραδιοεκπομπής από τον κύριο πυρήνα (Βορράς-Νότος). Η ανίχνευση είναι επιμήκης, με τη μορφή «νήματος». Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3. ***Πάνω***: Ανίχνευση νήματος σε θετικές ταχύτητες στο CO(1-0) από το «ρηχό»/υψηλής χωρικής ανάλυσης κύβο δεδομένων. ***Κάτω***: Ανίχνευση νήματος σε αρνητικές ταχύτητες στο CO(1-0) από το «βαθύ»/χαμηλής χωρικής ανάλυσης κύβο δεδομένων.

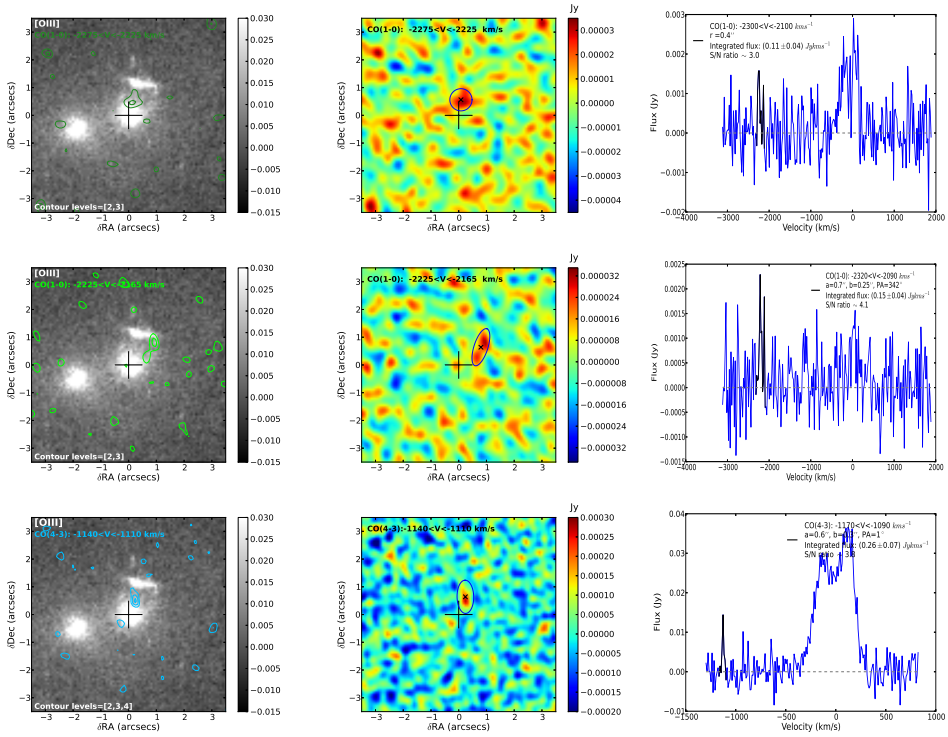
4.3.2 Περιοχή Μεταξύ του Κύριου Πυρήνα και του Ridge

Βόρεια του κύριου πυρήνα υπάρχει η πολύ λαμπρή περιοχή που εκπέμπει στο [O III] , για την οποία συζητήσαμε στο Κεφάλαιο 1, το νηματοειδές "ridge" (βλ. εικόνα στο οπτικό, εκπομπή [O III] στο Σχήμα 1.3). Σχεδιάζοντας τα contours των εικόνων που προκύπτουν από τα CO δεδομένα μας, σε χαμηλές ταχύτητες (εύρος: -100 km s^{-1} έως 100 km s^{-1}), πάνω στην οπτική εικόνα του 4C12.50 (Σχήμα 4.14) παρατηρούμε ότι ο δίσκος του μοριακού αερίου «κόβεται» απότομα κατά μήκος του ridge. Αυτό το αποτέλεσμα θα μπορούσε να ερμηνευθεί από μία αλλαγή φάσης του μοριακού αερίου του δίσκου στη συγκεκριμένη περιοχή, από μοριακό σε ιονισμένο. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό εάν αποτεθεί στο μοριακό αέριο επαρκής ενέργεια, ώστε να το ιονίσει. Κατάλληλοι μηχανισμοί για κάτι τέτοιο είναι: ακτινοβολία από τα αστέρια της περιοχής ή από τον AGN, εναπόθεση ενέργειας από το θερμό υλικό στο εσωτερικό του «κουκουλιού» ("coccon") που περιβάλλει τον πίδακα, κ.ά.



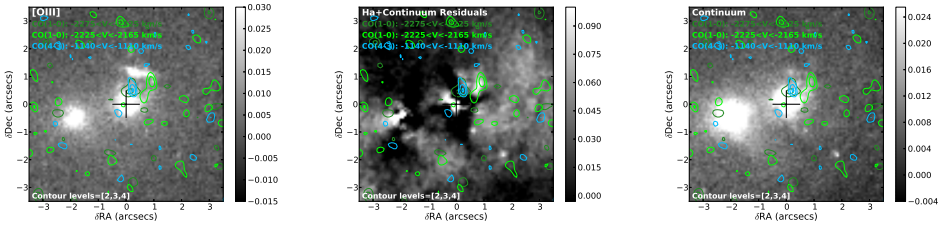
Σχήμα 4.14: Contours της εκπομπής στο CO, σε εύρος ταχύτητας: -100 km s^{-1} έως 100 km s^{-1} πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής [O III] . Τα contours δείχνουν ότι ο δίσκος του CO μοριακού αερίου κόβεται απότομα κατά μήκος του [O III] ridge, πιθανώς υποδεικνύοντας αλλαγή φάσης του αερίου. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.

Στην οπτική εικόνα του [O III] (Σχήμα 1.3) φαίνονται αρκετά νήματα που απλώνονται ακτινικά από τον κύριο πυρήνα προς το ridge (Κεφάλαιο 1). Μέσω των δεδομένων CO(1-0) και CO(4-3) της ALMA, ανιχνεύουμε μοριακό αέριο σε πολύ υψηλές ταχύτητες στην περιοχή. Πιο αναλυτικά, έχουμε ανίχνευση CO(1-0) σε ταχύτητες ∼-2200 km s^{-1} και στο CO(4-3) σε ταχύτητες ∼-1130 km s^{-1} , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.15. Αξίζει να επισημανθεί ότι οι συγκεκριμένες ανιχνεύσεις αποτελούν τις μόνες ανιχνεύσεις, στα δεδομένα μας, εκτός της πυρηνικής περιοχής (Ενότητα 4.3.5) και της περιοχής νότια του κύριου πυρήνα (4.3.1), στις οποίες υπάρχει ανίχνευση στο CO(4-3) , δηλαδή ανίχνευση μοριακού αερίου με υψηλή διέγερση.



Σχήμα 4.15: Ανιχνεύσεις CO(1-0) και CO(4-3) , στην περιοχή μεταξύ κύριου πυρήνα και [O III] ridge σε υψηλές ταχύτητες, πιθανώς υποδεικνύοντας την ύπαρξη ανέμου στην περιοχή. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.

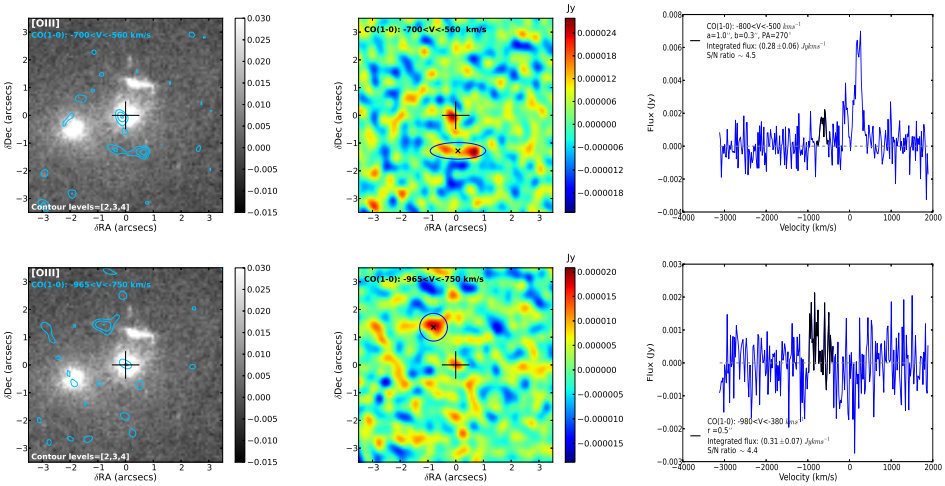
Τα contours των ανιχνεύσεων μας σχεδιασμένα πάνω από την οπτική εικόνα του [O III] αποκαλύπτουν ότι οι ανιχνεύσεις μας συμπίπτουν χωρικά με δύο διακριτά νήματα του [O III] . Επίσης, τα ίδια contours σχεδιασμένα πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής των αστεριών αποκαλύπτούν ότι η περιοχή των ανιχνεύσεων συμπίπτει με περιοχή στην οποία υπάρχουν αστέρια (Σχήμα 5.1), δημιουργώντας δύο πιθανά σενάρια: είτε ο άνεμος είναι τοπικός, αστρικής προέλευσης είτε οφείλεται στον AGN.



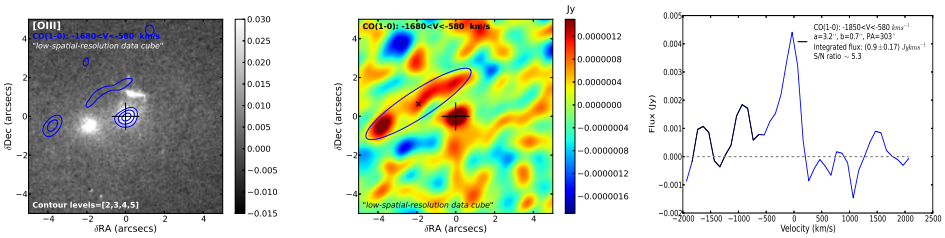
Σχήμα 4.16: Συνολική εικόνα των ανιχνεύσεων στην περιοχή μεταξύ κύριου πυρήνα και [O III] ridge σε υψηλές ταχύτητες. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3. ***Αριστερά***: Contours των ανιχνεύσεων πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής [O III] . ***Κέντρο***: Contours των ανιχνεύσεων πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής H_α + συνεχές από την οποία αφαιρέσαμε το μοντέλο 1 bulge και 2 δίσκων. ***Δεξιά***: Contours των ανιχνεύσεων πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής των αστεριών.

4.3.3 Πιθανή Ανίχνευση Αδιαβατικά Διαστελλόμενης Φυσαλίδας

Όπως εξηγήσαμε και στην Ενότητα 4.3.1, η επιμήκης δομή, το «νήμα» που ανιχνεύσαμε νότια του κύριου πυρήνα θα μπορούσε να αποκαλύπτει την ύπαρξη μοριακού ανέμου, λόγω του ραδιοφωνικού πίδακα που εκτοξεύεται από τον κύριο πυρήνα. Έχοντας αυτό κατά νου, ψάξαμε στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον κύριο πυρήνα, για μοριακά νέφη τα οποία ενδεχομένως σπρώχθηκαν μακριά από τον πυρήνα, λόγω του «κουκουλιού» που περιβάλλει το ράδιο-πίδακα (jet cocoon) ή λόγω μίας επαγόμενης από τον πίδακα, αδιαβατικά διαστελλόμενης «φούσκας/φυσαλίδας» (bubble). Με άλλα λόγια, ψάξαμε για ανιχνεύσεις νεφών με υψηλές ταχύτητες, τα οποία είναι είτε διεσπαρμένα σχεδόν εφαπτομενικά στον άξονα διάδοσης του ράδιο-πίδακα είτε σχεδόν παράλληλα στο [O III] ridge είτε ακτινικά, στην επιφάνεια μίας σφαίρας γύρω από τον κύριο πυρήνα. Τα αποτελέσματα αυτήν της προσπάθειάς μας αυτής για τα δεδομένα του «ρηχού» και του «βαθύ» κύβου στο CO(1-0) φαίνονται στα Σχήματα 4.17 και 4.18, αντίστοιχα.

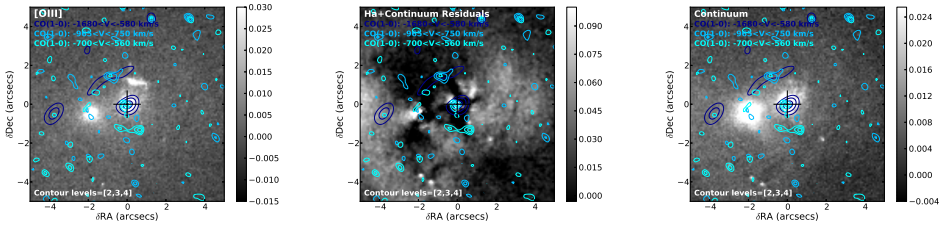


Σχήμα 4.17: Ανιχνεύσεις μοριακών νεφών CO(1-0) σε υψηλές ταχύτητες, πιθανώς μέρος της αδιαβατικά διαστελλόμενης «φούσκας»/φυσαλίδας λόγω του πίδακα από τον κύριο πυρήνα. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.



Σχήμα 4.18: Πιθανή ανίχνευση της αδιαβατικά διαστελλόμενης «φούσκας»/φυσαλίδας από τα δεδομένα του «βαθύ»/χαμηλής χωρικής ανάλυσης κύβου δεδομένων CO(1-0) . Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.

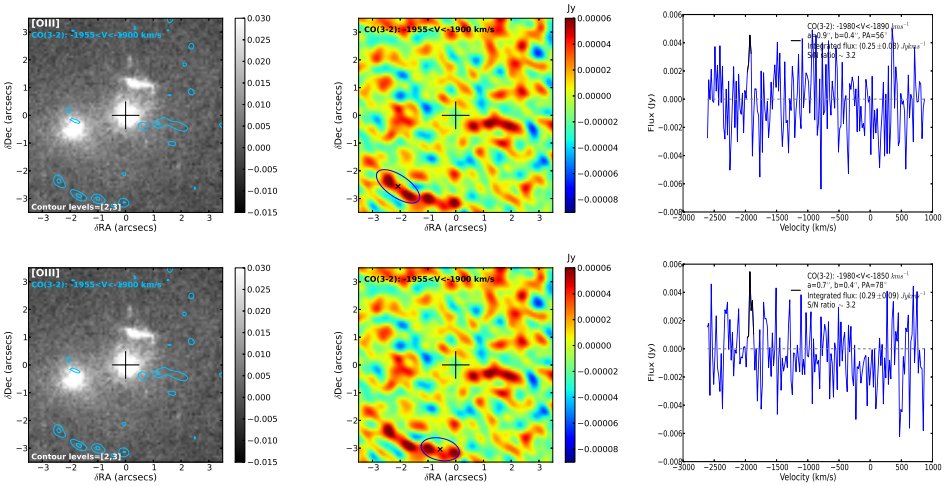
Στο Σχήμα 4.18, στα βορειοανατολικά του κύριου πυρήνα φαίνεται τμήμα της φούσκας/φυσαλίδας (bubble) για την οποία συζητήσαμε. Αυτή η ανίχνευση υπάρχει μόνο στα δεδομένα του «βαθύ» κύβου και θα μπορούσε να είναι πραγματική (αν και δεν υπάρχει ακριβώς η ίδια στα δεδομένα του «ρηχού» κύβου) ή να οφείλεται στη χαμηλότερη χωρική ανάλυση των δεδομένων του κύβου και κατ' επέκταση στο «άπλωμα» της beam ("beam smearing"), σε συνδυασμό με το γεγονός ότι υπάρχουν δύο γειτονικές δομές χαμηλής έντασης σήματος. Υπέρ του ότι η συγκεκριμένη ανίχνευση είναι πραγματική συνηγορεί το γεγονός ότι στην ίδια περιοχή έχουμε μία λιγότερο εκτεταμένη ανίχνευση, στα δεδομένα του «ρηχού» κύβου, με ταχύτητα ∼-800 km s^{-1} η οποία αντιστοιχεί σε νέφη που φαίνεται να είναι συνέχεια του [O III] ridge. Η ανίχνευση νότια του κύριου πυρήνα με ταχύτητα ∼-650 km s^{-1} , επίσης απέχει από αυτόν απόσταση περίπου όση και το ridge. Το σενάριο μίας διαστελλόμενης φούσκα/φυσαλίδας υποστηρίζεται περαιτέρω από τη διασπορά της ταχύτητας, παραδείγματος χάρη του CO(3-2) (Σχήμα 4.7). Η πιθανή φούσκα/φυσαλίδα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.19.



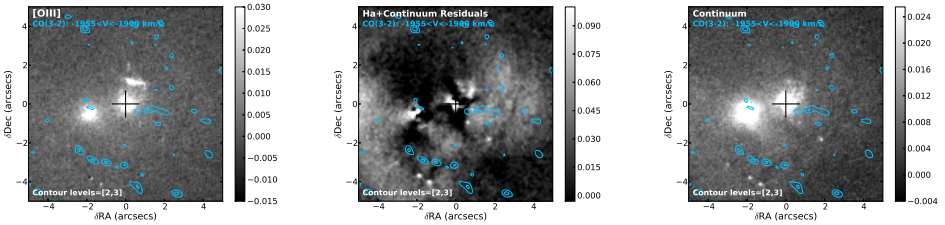
Σχήμα 4.19: Συνολική εικόνα της πιθανής αδιαβατικά διαστελλόμενης «φούσκας»/φυσαλίδας στο CO(1-0) . Τα contours στο εύρος ταχυτήτων: -1680 km s^{-1} < V < -580 km s^{-1} προέρχονται από δεδομένα του «βαθύ»/χαμηλής χωρικής ανάλυσης κύβου δεδομένων CO(1-0) (Σχήμα 4.18). Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3. ***Αριστερά***: Contours των ανιχνεύσεων πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής [O III] . ***Κέντρο***: Contours των ανιχνεύσεων πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής H_α + συνεχές από την οποία αφαιρέσαμε το μοντέλο 1 bulge και 2 δίσκων. ***Δεξιά***: Contours των ανιχνεύσεων πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής των αστεριών.

4.3.4 Πιθανή ανίχνευση αστρικού ανέμου

Νότια του δευτερεύοντος/ανατολικού πυρήνα του 4C12.50 ανιχνεύουμε μία σειρά νεφών, που είναι ενδεικτική δομών που κινούνται με υψηλή ταχύτητα μέσα στο ISM. Αυτές οι δομές ανιχνεύονται εντός του εύρους ταχυτήτων: -1960 km s^{-1}<V<-1900 km s^{-1} και παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.20 και 4.21. Νότια του κύριου και του δευτερεύοντος πυρήνα ανιχνεύονται σημειακές πηγές που εκπέμπουν στο συνεχές (Σχήμα 1.3), οι οποίες αποτελούν αστρικά υπέρ-σμήνη που περιέχουν νεαρούς αστρικούς πληθυσμούς (Rodríguez-Zaurín et al., 2007). Επίσης, νεαροί αστρικοί πληθυσμοί υπάρχουν και στην άλω του συνεχούς, που φαίνεται στο Σχήμα 1.3 (Rodríguez-Zaurín et al., 2007). Έτσι, ένα πιθανό σενάριο θα μπορούσε να είναι το εξής: οι προαναφερθείσες ανιχνεύσεις, αν και δε συμπίπτουν με τα νεαρά υπερσμήνη, ακολουθούν τη χωρική κατανομή τους (Σχήμα 4.21), επομένως, θα μπορούσαν να είναι ανιχνεύσεις ανέμου λόγω των νεαρών αστρικών πληθυσμών στην περιοχή.



Σχήμα 4.20: Ταχέως κινούμενες δομές νότιο-ανατολικά του δευτερεύοντος πυρήνα. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.

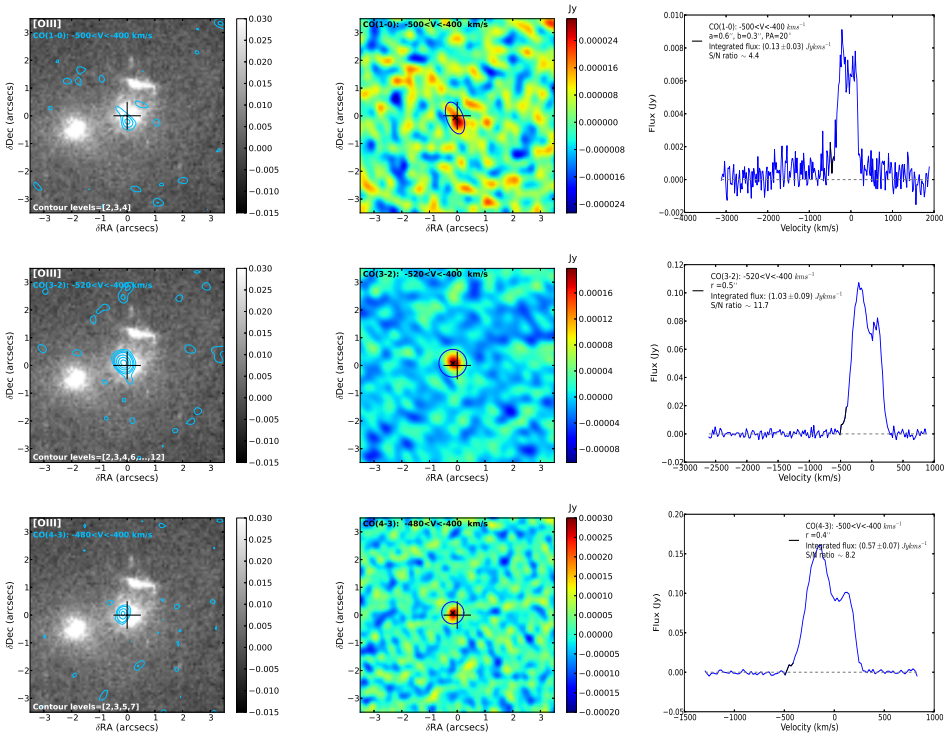


Σχήμα 4.21: Contours των ταχέως κινούμενων δομών νότιο-ανατολικά του δευτερεύοντος πυρήνα πάνω από τις εικόνες στο οπτικό. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3. ***Αριστερά***: Contours των ανιχνεύσεων πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής [O III] . ***Κέντρο***: Contours των ανιχνεύσεων πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής H_α + συνεχές από την οποία αφαιρέσαμε το μοντέλο 1 bulge και 2 δίσκων. ***Δεξιά***: Contours των ανιχνεύσεων πάνω από την οπτική εικόνα της εκπομπής των αστεριών.

4.3.5 Πυρηνικός Άνεμος

Η ανίχνευση μοριακού ανέμου στα δεδομένα μας την οποία μπορούμε να θεωρήσουμε πιο αναμενόμενη, εξαιτίας προηγούμενης ανακάλυψής της σε απορρόφηση (Morganti et al., 2005; Dasyra and Combes, 2012), είναι αυτή που χωρικά συμπίπτει με την κεντρική περιοχή του κύριου πυρήνα. Το χαμηλότερο εύρος της ταχύτητας στο οποίο ανιχνεύουμε τον άνεμο δεν είναι τόσο ξεκάθαρα καθορισμένο, καθώς υπάρχει ανίχνευση και σε αρκετά χαμηλές ταχύτητες στην πυρηνική περιοχή, που συνδέεται με το δίσκο και την ανίχνευση νότια του κύριου πυρήνα για την οποία συζητήσαμε στην Ενότητα 4.3.1. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις θετικές ταχύτητες ο δίσκος του αερίου φθίνει και χάνεται ήδη σε ταχύτητες ∼300-400 km s^{-1} και μάλιστα σε αυτό το εύρος μόνο η νότια ανίχνευση είναι πλέον ορατή. Αυτό

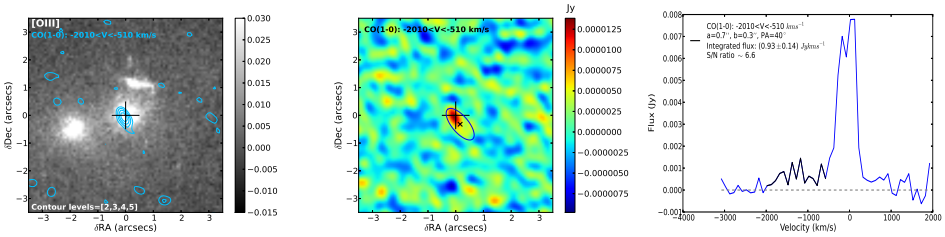
είναι μία καλή ένδειξη για το ότι όλο το αέριο που ανιχνεύεται σε αρνητικές ταχύτητες: V<-400 km s^{-1} θα μπορούσε να θεωρηθεί μέρος του ανέμου κι όχι του δίσκου υπό την προϋπόθεση ότι ο γαλαξίας είναι συμμετρικός. Όμως, για να είμαστε βέβαιοι για την ανίχνευση θέτουμε το κατώτερο εύρος της ανίχνευσης σε ταχύτητα ∼-500 km s^{-1} (Σχήμα 4.22).



Σχήμα 4.22: Στην πυρηνική περιοχή έχουμε ανιχνεύσεις στο CO(1-0) , CO(3-2) και CO(4-3)σε ταχύτητες ∼-500 km s^{-1} -400 km s^{-1} , επομένως δε μπορούν να διαχωριστούν από το δίσκο και να θεωρηθούν με βεβαιότητα άνεμοι. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.

Ωστόσο, στην περιοχή του κύριου πυρήνα ανιχνεύεται και πυρηνική εκπομπή, που είναι ιδιαίτερα λαμπρή στο CO(1-0) ακόμη και σε αρκετά υψηλές ταχύτητες της τάξης των∼-2000 km s^{-1} (Σχήμα 4.23). Από την ολοκληρωμένη ροή, που εξάγουμε από το φάσμα της ανίχνευσης, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μάζα του μοριακού ανέμου στο εύρος ταχυτήτων -2010 km s^{-1} < V < -510 km s^{-1} :

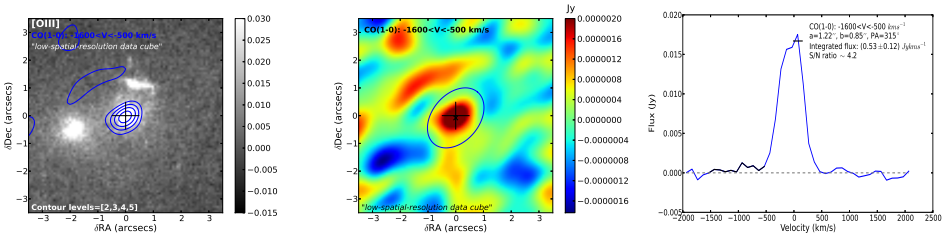
$$M_{H_2}^{wind} = 5.2(\pm 0.8) \times 10^8 \, M_\odot \qquad [4.1]$$



Σχήμα 4.23: Ανιχνεύση πυρηνικού ανέμου με μικρή απόκλιση από το κέντρο του κύριο πυρήνα στα δεδομένα CO(1-0) σε εύρος ταχυτήτων: -2010 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ < V < -510 $\mathrm{km\,s^{-1}}$. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.

Ανίχνευση του πυρηνικού μοριακού ανέμου έχουμε και στα CO(1-0) δεδομένα του «βαθύ»/χαμηλής χωρικής ανάλυσης κύβου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.24, η οποία επιβεβαιώνει μέρος από την αντίστοιχη προαναφερθείσα ανίχνευση από το «ρηχό» κύβο (Σχήμα 4.23). Από την ολοκληρωμένη ροή, που εξάγουμε από το φάσμα της ανίχνευσης, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μάζα του μοριακού ανέμου:

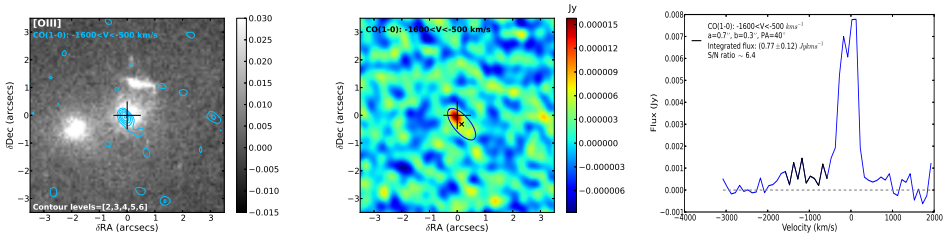
$$M_{H_2}^{wind} = 3.0(\pm 0.7) \times 10^8\, M_\odot \qquad [4.2]$$



Σχήμα 4.24: Ανιχνεύση πυρηνικού ανέμου με μικρή απόκλιση από το κέντρο του κύριο πυρήνα στα δεδομένα CO(1-0) σε εύρος ταχυτήτων: -1600 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ < V < -500 $\mathrm{km\,s^{-1}}$, από τα δεδομένα του «βαθύ»/χαμηλής χωρικής ανάλυσης κύβου δεδομένων CO(1-0) . Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.

Όπως εξηγήσαμε, από τα CO(1-0) δεδομένα του «βαθύ»/χαμηλής χωρικής ανάλυσης κύβου επιβεβαιώνεται το μέρος του πυρηνικού ανέμου στο εύρος ταχυτήτων: -1600 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ < V < -500 $\mathrm{km\,s^{-1}}$, ενώ η ανίχνευση του ανέμου από τα δεδομένα του «ρηχού» κύβου έγινε σε εύρος ταχυτήτων -2010 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ < V < -510 $\mathrm{km\,s^{-1}}$. Ως εκ τούτου, η πιο βέβαιη ανίχνευση του ανέμου είναι στο εύρος -1600 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ < V < -500 $\mathrm{km\,s^{-1}}$. Υπολογίζοντας τη μάζα του μοριακού ανέμου στη συγκεκριμένη περιοχή και από τα δεδομένα του «ρηχού» κύβου βρίσκουμε:

$$M_{H_2}^{wind} = 4.3(\pm 0.7) \times 10^8\, M_\odot \qquad [4.3]$$



Σχήμα 4.25: Ανιχνεύση πυρηνικού ανέμου με μικρή απόκλιση από το κέντρο του κύριο πυρήνα στα δεδομένα CO(1-0) σε εύρος ταχυτήτων: -1600 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ < V < -500 $\mathrm{km\,s^{-1}}$, από τα δεδομένα του «ρηχού»/χαμηλής χωρικής ανάλυσης κύβου δεδομένων CO(1-0) . Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3.

4.3.6 Μελέτη της Διέγερσης του Αερίου

Οι θεωρητικοί υπολογισμοί για οπτικά πυκνό αέριο δίνουν πηλίκα ροής:

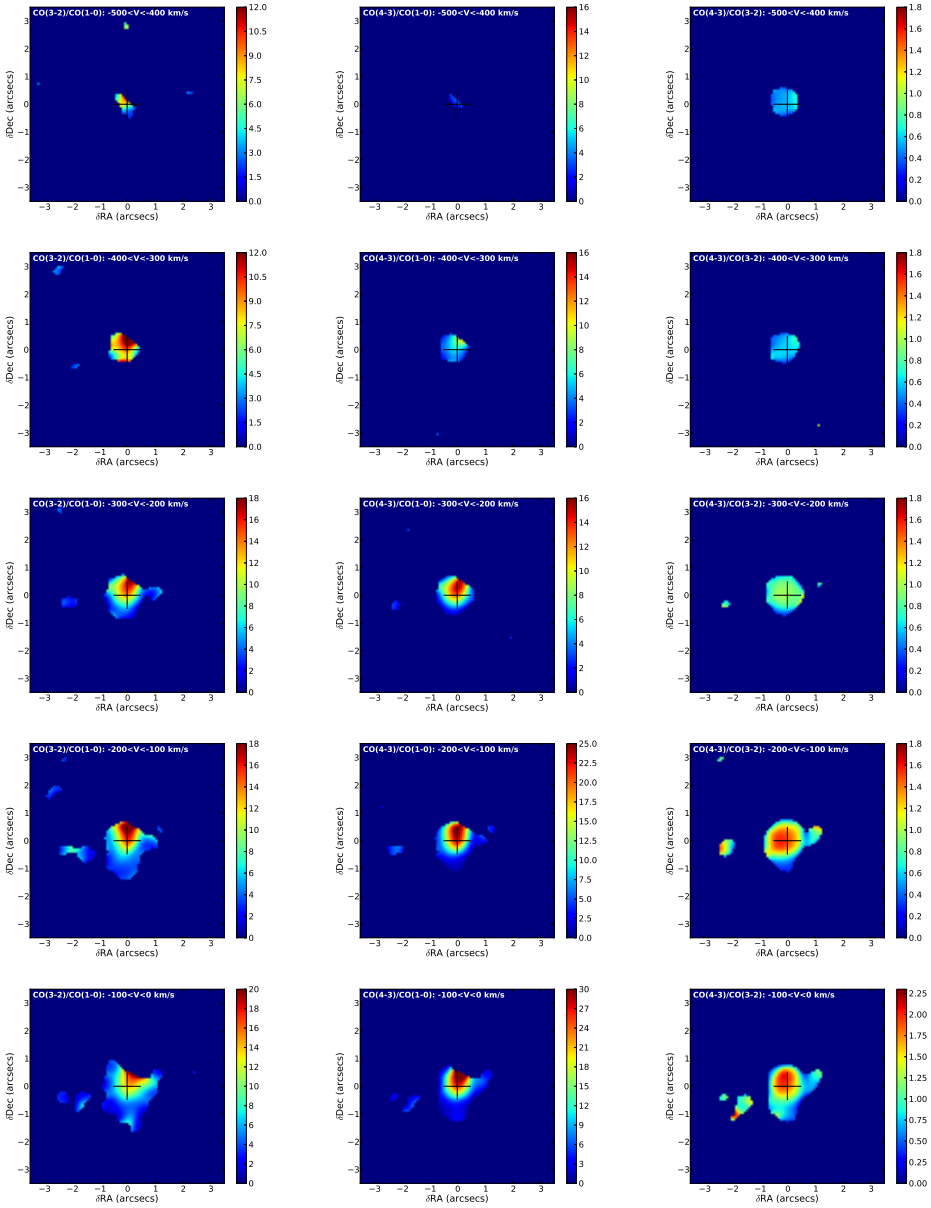
- $\frac{\mathrm{CO(3\text{-}2)}}{\mathrm{CO(1\text{-}0)}} < 9$
- $\frac{\mathrm{CO(4\text{-}3)}}{\mathrm{CO(1\text{-}0)}} < 16$
- $\frac{\mathrm{CO(4\text{-}3)}}{\mathrm{CO(3\text{-}2)}} < 1.8$

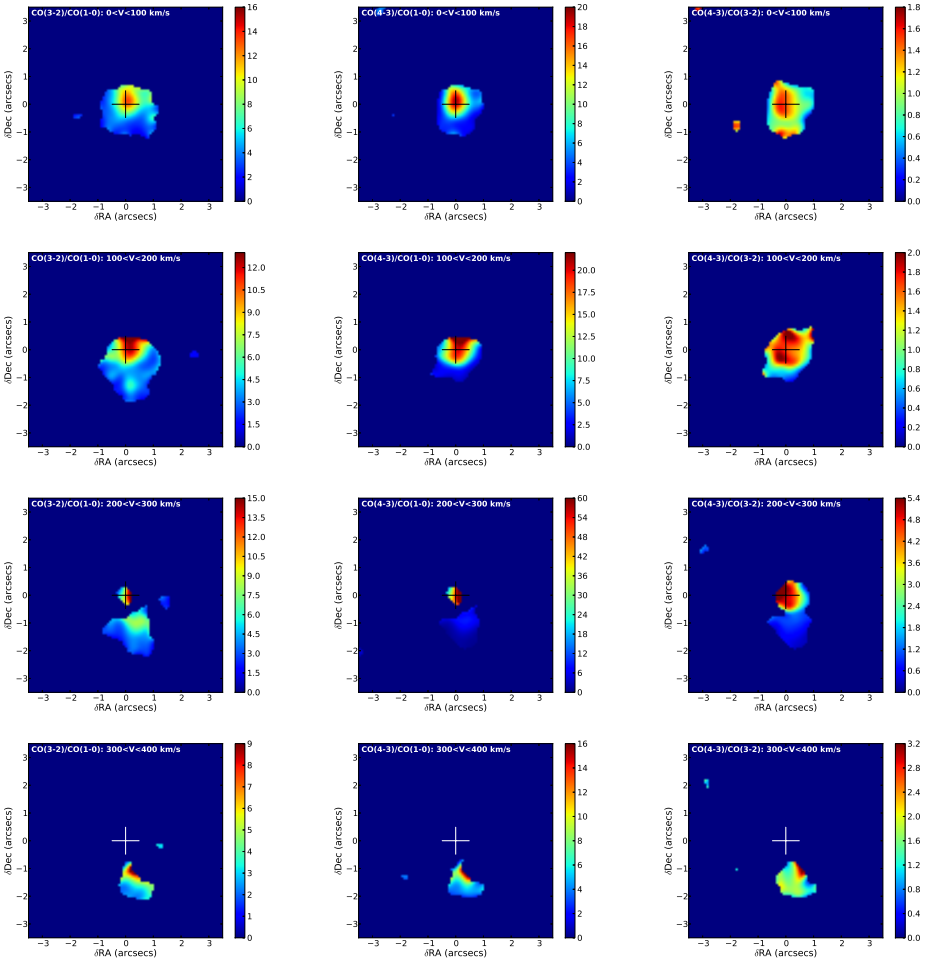
Για οπτικά αραιό αέριο τα θεωρητικά προβλεπόμενα πηλίκα ροής (Paraschos, 2017) είναι:

- $\frac{\mathrm{CO(3\text{-}2)}}{\mathrm{CO(1\text{-}0)}} < 81$
- $\frac{\mathrm{CO(4\text{-}3)}}{\mathrm{CO(1\text{-}0)}} < 256$
- $\frac{\mathrm{CO(4\text{-}3)}}{\mathrm{CO(3\text{-}2)}} < 3.2$

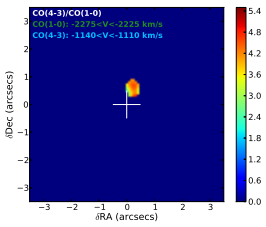
Αέριο το οποίο υπερβαίνει τα όρια του οπτικά αραιού θεωρείται υψηλά διεγερμένο. Τα παρατηρούμενα πηλίκα ροής για το δίσκο, την ανίχνευση νότια του κύριου πυρήνα και τις ανιχνεύσεις στην περιοχή του ridge παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.26 και 4.27, τα οποία δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης («ρηχός» κύβος δεδομένων) και κοινής beam (Ενότητα 3.2). Δε μπορούμε να θεωρήσουμε τις τιμές των πηλίκων ροής που δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας τους κύβους δεδομένων του CO(1-0) ως απόλυτες εξαιτίας της απώλειας ροής που έχουν τα συγκεκριμένα δεδομένα. Ωστόσο, μπορούν να θεωρηθούν ως ανώτερα όρια των τιμών των πηλίκων και να χρησιμοποιηθούν ως ενδείξεις των περιοχών ενδιαφέροντος, στις οποίες αξίζει να ψάξουμε για διεγερμένο αέριο. Ωστόσο, για να ανιχνεύσουμε, επιβεβαιώσουμε ή καταρρίψουμε τις διαφορές διέγερση του αερίου σε αυτές τις περιοχές, χρειαζόμαστε το πηλίκο ροής CO(4-3)/CO(3-2) .

Ανιχνεύσαμε υψηλά διεγερμένο αέριο, το οποίο υπερβαίνει τα όρια του οπτικά πυκνού, σε διάφορα εύρη ταχητήτων (Σχήματα 4.26), αλλά η υψηλότερη διέγερση εμφανίζεται σε εύρος ταχυτήτων: $200\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως $300\,\mathrm{km\,s^{-1}}$. Αυτή η υψηλή διέγερση, που υποδεικνύει την ύπαρξη οπτικά ρηχού και πιθανώς θερμασμένου αερίου, χωρικά βρίσκεται ελαφρώς μετατοπισμένη συγκριτικά με το κέντρο του πυρήνα και είναι πιθανό να συνδέεται με τον πυρηνικό άνεμο, για τον οποίο συζητήσαμε στην Ενότητα 4.3.5. Μελετώντας τη διέγερση του αερίου στην περιοχή και στο έυρος ταχυτήτων του «νήματος» ($300\,\mathrm{km\,s^{-1}} < V < 400\,\mathrm{km\,s^{-1}}$) που ανιχνεύουμε στην περιοχή νότια του κύριου πυρήνα (Ενότητα 4.3.1) δεν ανιχνεύουμε αέριο το οποίο να είναι οπτικά αραιό. Επίσης, στην περιοχή μεταξύ του κύριου πυρήνα και του [O III] ridge, η τιμή του πηλίκου ροής CO(4-3)/CO(1-0) είναι $\sim$4 (Σχήμα 4.27), κάτι το οποίο δεν υποδηλώνει οπτικά αραιό αέριο στην περιοχή, αλλά δεδομένου ότι $\sim$ η μισή ροή έχει χαθεί στα CO(1-0) δεδομένα και το ίδιο το πηλίκο δεν είναι τόσο χαμηλό, ενδεχομένως να υποστηρίζει το σενάριο ανέμου στην περιοχή.


CO(3-2)/CO(1-0): -500<V<-400 km/s
CO(4-3)/CO(1-0): -500<V<-400 km/s
CO(4-3)/CO(3-2): -500<V<-400 km/s
CO(3-2)/CO(1-0): -400<V<-300 km/s
CO(4-3)/CO(1-0): -400<V<-300 km/s
CO(4-3)/CO(3-2): -400<V<-300 km/s
CO(3-2)/CO(1-0): -300<V<-200 km/s
CO(4-3)/CO(1-0): -300<V<-200 km/s
CO(4-3)/CO(3-2): -300<V<-200 km/s
CO(3-2)/CO(1-0): -200<V<-100 km/s
CO(4-3)/CO(1-0): -200<V<-100 km/s
CO(4-3)/CO(3-2): -200<V<-100 km/s
CO(3-2)/CO(1-0): -100<V<0 km/s
CO(4-3)/CO(1-0): -100<V<0 km/s
CO(4-3)/CO(3-2): -100<V<0 km/s
δDec (arcsecs)
δRA (arcsecs)



Σχήμα 4.26: Πηλίκα ροών για τα CO(1-0) , CO(3-2) και CO(4-3) σε εύρη ταχυτήτων του δίσκου και της νότιας ανίχνευσης (εύρη ταχυτήτων ανά 100 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ εντός του εύρους: -500 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως 400 $\mathrm{km\,s^{-1}}$). Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3. ***Αριστερά***:CO(3-2)/CO(1-0) . ***Κέντρο***: CO(4-3)/CO(1-0) . ***Δεξιά***: CO(4-3)/CO(3-2) .



Σχήμα 4.27: Πηλίκα ροών για τα CO(1-0) , CO(3-2) και CO(4-3) στις υψηλές ταχύτητες των ανιχνεύσεων μεταξύ κύριου πυρήνα και [O III] ridge. Ο σταυρός καταδεικνύει τη θέση της μέγιστης εκπομπής του συνεχούς στη μπάντα 3. ***Αριστερά***:CO(3-2)/CO(1-0) . ***Κέντρο***: CO(4-3)/CO(1-0) . ***Δεξιά***: CO(4-3)/CO(3-2)

Κεφάλαιο 5

Συζήτηση επί των Αποτελεσμάτων

5.0.1 Υπολογισμός Μάζας Μοριακού Αερίου H_2

Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλές δομές λόγω της συγχώνευσης των γαλαξιών, θα πρέπει να επισημανθεί ότι χρειάζεταιιδιαίτερη προσοχή κατά την ταυτοποίηση/ανίχνευση των μοριακών ανέμων.

Κατ' αρχάς, νότια του κύριου πυρήνα ανακαλύψαμε μία επιμήκη δομή, ένα «νήμα» κατά μήκος του άξονα διάδοσης του ραδιοφωνικού πίδακα, στα CO(1-0) δεδομένα του «βαθύ» κύβου, όπως εξηγήσαμε στην Ενότητα 4.3.1 (Σχήμα 4.10). Από την ολοκληρωμένη ροή του CO(1-0) φάσματος της συγκεκριμένης ανίχνευσης (-975 km s^{-1} < V < -875 km s^{-1}) και τη σχέση 2.3 (Solomon et al., 1997) υπολογίζουμε την αντίστοιχη μάζα του H_2:

$$M_{H_2}^{filament} = 3.7(\pm 0.6) \times 10^8\, M_\odot \qquad [5.1]$$

Όπως συζητήσαμε στην Ενότητα 4.3.2 έχουμε ανιχνεύσεις δομών σε πολύ υψηλές ταχύτητες: ∼-2250 km s^{-1} στο CO(1-0) και ∼-1130 km s^{-1} στο CO(4-3) στην περιοχή μεταξύ του κύριου πυρήνα και του [O III] "ridge"[1]. Χρησιμοποιώντας την ολοκληρωμένη ροή που εξάγουμε από τα φάσματα των δομών που ανιχνεύονται στα CO(1-0) δεδομένα (Σχήμα 4.15) και τη σχέση 2.3 υπολογίζουμε τη συνολική H_2 μάζα των δομών και βρίσκουμε ότι είναι ίση με:

$$\begin{aligned} M_{H_2}^{ridge} &= [0.62(\pm 0.23) + 0.85(\pm 0.23)] \times 10^8\, M_\odot \Rightarrow \\ M_{H_2}^{ridge} &= 1.5(\pm 0.3) \times 10^8\, M_\odot \end{aligned} \qquad [5.2]$$

Συζητώντας για το σενάριο της ύπαρξης μίας αδιαβατικά διαστελλόμενης «φούσκας/φυσαλίδας» επαγόμενης από τον ράδιο-πίδακα στην Ενότητα 4.3.3, παρουσιάσαμε χαρακτηριστικές δομές που ανιχνεύσαμε στα CO(1-0) δεδομένα τόσο του «ρηχού» όσο και του «βαθύ» κύβου, οι οποίες δύνανται να υποστηρίξουν την ύπαρξή μίας τέτοιας «φούσκας» (Σχήματα 4.17, 4.18 και 4.19). Ομοίως με προηγουμένως, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μάζα H_2 που θα είχε η «φούσκα» μέσω της ολοκληρωμένης ροής των αντίστοιχων CO(1-0) φασμάτων. Να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό μας θα χρησιμοποιήσουμε τη ροή από τις ανιχνεύσεις του «βαθύ» κύβου για τις δομές βοριοανατολικά του κύριου πυρήνα (Σχήμα 4.18), μιας και στα δεδομένα του «ρηχού» κύβου υπάρχει -όπως έχουμε αναφέρει- απώλεια ροής (βλ.

[1] βλ. Κεφάλαιο 1

Ενότητα 3.2). Επίσης, θα χρησιμοποιήσουμε τη ροή της ανίχνευσης στο εύρος ταχυτήτων: -700 km s^{-1} < V < -560 km s^{-1} στα νότια του κύριου πυρήνα (Σχήμα 4.17), από τα δεδομένα του «ρηχού» κύβου, μιάς και δεν έχουμε αντίστοιχη ανίχνευση στο «βαθύ»/χαμηλής χωρικής ανάλυσης κύβο. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, υπολογίζουμε τη συνολική μάζα της πιθανής «φούσκας» ίση με:

$$\begin{aligned} M_{H_2}^{bubble} &= [5(\pm 1) + 1.6(\pm 0.3)] \times 10^8\, M_\odot \Rightarrow \\ M_{H_2}^{bubble} &= 6.6(\pm 1.0) \times 10^8\, M_\odot \end{aligned} \qquad [5.3]$$

Η πιο βέβαιη ανίχνευση του ανέμου έγινε στην κεντρική περιοχή του κύριου πυρήνα, όπως εξηγήσαμε στην Ενότητα 4.3.5. Ο υπολογισμός της μάζας του κεντρικού ανέμου έγινε από τα CO(1-0) δεδομένα του «ρηχού» κύβου και από τα δεδομένα του «βαθύ» κύβου και δίνεται από τις σχέσεις: 4.3: $M_{H_2}^{wind} = 4.3(\pm 0.7) \times 10^8\, M_\odot$ και 4.2: $M_{H_2}^{wind} = 3.0(\pm 0.7) \times 10^8\, M_\odot$, αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας την τιμή που υπολογίσαμε από τα δεδομένα του «ρηχού» κύβου βρίσκουμε ότι ο κεντρικός άνεμος παρασύρει $\sim 4\%$ του αερίου του δίσκου με υψηλή ταχύτητα (δηλαδή V>500 km s^{-1}). Ωστόσο, επειδή όπως έχουμε εξηγήσει υπάρχει κάποια απώλεια ροής στα δεδομένα του «ρηχού» κύβου CO(1-0) , είναι πιο ασφαλές να χρησιμοποιήσουμε για τους υπόλοιπους υπολογισμούς μας τα δεδομένα του «βαθύ» κύβου, για τις περιοχές που διαθέτουμε τέτοια δεδομένα.

Ο μοριακός άνεμος θα μπορούσε να επηρεάσει την εξέλιξη του γαλαξία είτε μέσω θέρμανσης (heating) είτε μέσω επιτάχυνσης και διαφυγής (ejection) του αερίου.

5.0.2 Θέρμανση (Heating) Αερίου

Προηγούμενες παρατηρήσεις του H_2 με το διαστημικό τηλεσκόπιο Spitzer βρέθηκε η μάζα του θερμού ($\sim$ 400 K) μοριακού αερίου του δίσκου είναι: $1.4(\pm 0.2) \times 10^8\, M_\odot$ και η μάζα του θερμού μοριακού ανέμου είναι: $5.2(\pm 1.7) \times 10^7\, M_\odot$ (Dasyra and Combes, 2011). Επίσης, υπολογίσαμε τη μάζα του κρύου ($\sim$ 25 K) μοριακού αερίου του δίσκου (Κεφάλαιο 1) και τη βρήκαμε ίση με: $9.7(\pm 0.2) \times 10^9\, M_\odot$. Χρησιμοποιώντας την τιμή της μάζας του κεντρικού μοριακού ανέμου που υπολογίσαμε από τα δεδομένα του «βαθύ» κύβου και υπολογίζοντας τα πηλίκα μαζών για τον άνεμο και το δίσκο, το υλικό του οποίου αποτελεί τη βασική «δεξαμενή» υλικού για την αστρογένεση, έχουμε ότι:

$$\frac{M_{400K(outflow)}}{M_{25K(outflow)}} \sim 12 \cdot \frac{M_{400K(disk)}}{M_{25K(disk)}} \qquad [5.4]$$

Επομένως, ο λόγος του θερμού προς το ψυχρό αέριο για το επιταχυμένο αέριο στον άνεμο είναι περίπου 12 φορές υψηλότερο απ' ότι ο αντίστοιχος λόγος για το αέριο του δίσκου. Αυτό το αποτέλεσμα είναι μία ένδειξη θέρμανσης (heating) στον άνεμο, κάτι το οποίο θα μπορούσε να επιδράσει ανασταλτικά στην αστρογένεση. Στη συγκεκριμένη εργασία, παρατηρήσαμε τον κρύο μοριακό άνεμο σε εκπομπή. Ωστόσο, ο άνεμος έχει παρατηρηθεί και σε απορρόφηση σε προηγούμενες μελέτες: στο ουδέτερο HI από τους (Morganti et al., 2005) και στο H_2 από τους (Dasyra and

Combes, 2012). Η θέρμανση του μοριακού αερίου θα μπορούσε να οδηγήσει σε καταστάσεις υψηλότερης διέγερσης, κάτι το οποίο θα μπορούσε να είναι ένας από τους λόγους που η απορρόφηση που παρατηρήθηκε στο CO(3-2) ήταν ισχυρότερη από αυτήν που παρατηρήθηκε στο CO(1-0) (Dasyra and Combes, 2012).

5.0.3 Αποβολή (Ejection) Αερίου

Για να ελέγξουμε την επίδραση της επιτάχυνσης και αποβολής αερίου από το γαλαξία, υπολογίζουμε το ρυθμό ροής μάζας $\dot{M}_{out}$ μέσω της ακόλουθης σχέσης, όπου: d είναι η απόσταση από το ραδιο-πυρήνα μέσα στην οποία βρίσκεται το αέριο που παρασύρεται και τη θεωρούμε ίση με: $d = 150pc$ (Morganti et al., 2013):

$$\dot{M}_{out} = \frac{M_{out}V_{out}}{d} \qquad [5.5]$$

Από τη σχέση 4.2 η μάζα του κεντρικού ανέμου είναι ίση με: $M_{out}(\mathrm{H_2}) = 3 \times 10^8\, M_\odot$ και ανιχνεύεται μέσα σε εύρος ταχυτήτων -τουλάχιστον (βλ. Ενότητα 4.3.5)- $-1600\,\mathrm{km\,s^{-1}} < V_{out} < -500\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, υποθέτωντας ότι το CO και το $\mathrm{H_2}$ έχουν κατά μέσο όρο την ίδια ταχύτητα. Για τις δύο οριακές τιμές της ταχύτητας μπορούμε να υπολογίσουμε το ρυθμό ροής μάζας του κρύου μοριακού αερίου, μέσω της σχέσης 5.5 και βρίσκουμε ότι είναι εντός του εύρους: $\dot{M}_{out} \sim (3.3 - 1.0) \times 10^3\, M_\odot yr^{-1}$ άρα μία μέση τιμή της ροής είναι: $\dot{M}_{out} \sim 2.2 \times 10^3\, M_\odot yr^{-1}$.

Ωστόσο, μόνο ένα μέρος αυτού του αερίου θα μπορούσε να διαφύγει από το γαλαξία. Η ταχύτητα διαφυγής από τον κύριο πυρήνα στα $d = 150pc$ είναι $V_{esc} \sim 700\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, θεωρώντας ότι η κατανομή της ορατής ύλης είναι σφαιρικά συμμετρική και ισόθερμη και χρησιμοποιώντας διασπορά ταχυτήτων των αστεριών $\sigma \sim 170\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ και ενεργό ακτίνα $R_{eff} \sim 2.6kpc$ (Dasyra et al., 2006). Επομένως, μόνο το τμήμα του αερίου με ταχύτητες $> 700\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ θα μπορούσε να διαφύγει. Υπολογίζοντας τη μάζα του ανιχνευθέντος ανέμου στο εύρος ταχυτήτων: $-1600\,\mathrm{km\,s^{-1}} < V_{out} < -700\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ βρίσκουμε ότι είναι: $M_{out}^{esc} = 2.4(\pm 0.7) \times 10^8\, M_\odot$. Παίρνοντας τη μέση τιμή ταχύτητας στο εύρος από $-1600\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ έως $-700\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ υπολογίζουμε ότι ο μέσος ρυθμός απώλειας μάζας είναι: $\dot{M}_{out}^{esc} \sim 1.9 \times 10^3\, M_\odot yr^{-1}$. Αυτή η απώλεια αντιστοιχεί σε ∼2.5% του κρύου αερίου του δίσκου.

Τα αποτελέσματά μας υποδεικνύουν πιθανή θέρμανση του αερίου στην κεντρική περιοχή και μικρό ποσοστό επιτάχυνσης και αποβολής του από το γαλαξία. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι μέρος του επιταχυμένου αερίου, αλλά και του αερίου που έχει υποστεί θέρμανση θα επιστρέψει στο δίσκο εντός μερικών δυναμικών χρόνων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τόσο η επιτάχυνση όσο και η θέρμανση του αερίου είναι πιθανό να καθυστερήσουν σε κάποιο βαθμό, προσωρινά την αστρική δημιουργία, αλλά όχι να την καταστείλουν στο γαλαξία 4C12.50.

5.0.4 Μηχανισμός Δημιουργίας Ανέμου (driver)

Η ισχύς ("kinetic luminosity") L_{kin}^{out} του ανέμου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

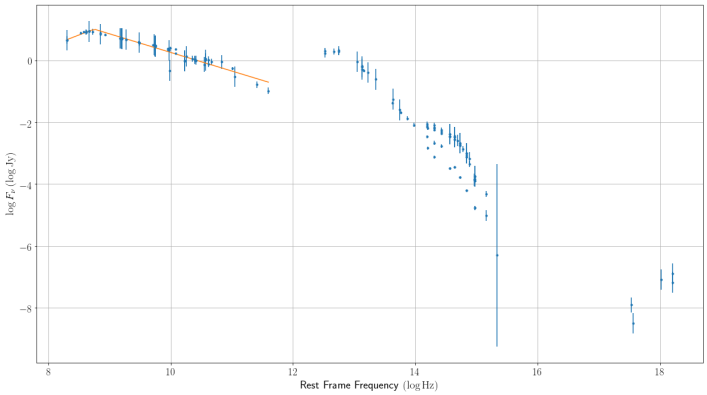
$$L_{kin}^{out} = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_{out} V_{out}^3}{d} \qquad [5.6]$$

όπου M_{out}, V_{out} και d οι τιμές για τις οποίες συζητήσαμε στην προηγούμενη Ενότητα 5.0.3 ($M_{out} = 3 \times 10^8\, M_\odot$, $V_{out} \sim 1050\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ και $d = 150pc$).

Η ισχύς που υπολογίζουμε από τη σχέση 5.6 είναι: $L_{kin}^{out} \sim 7.6 \times 10^{44} ergs^{-1}$.

Ραδιο-πίδακας

Προσαρμόζοντας κατάλληλο νόμο δύναμης στο φάσμα του 4C12.50 για τη ραδιοφωνική εκπομπή και ολοκληρώνοντας τη ροή ακτινοβολίας σε όλες τις συχνότητες που συμπεριλάβαμε στην προσαρμογή του νόμου δύναμης, μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ της ακτινοβολίας ($L = 4\pi D^2 \int F_\nu d\nu$) του ραδιο-πίδακα: $L_{kin}^{jet} = 9.68 \times 10^{43} ergs^{-1}$ (Papachristou et al., 2018, in prep.). Υπολογίζοντας και τη συνεισφορά των ακτίνων-Χ η υπολογιζόμενη ισχύς είναι της τάξης $\sim 10^{44} ergs^{-1}$ (Papachristou et al., 2018, in prep.).



Σχήμα 5.1: Νόμος δύναμης στο ραδιοφωνικό φάσμα του 4C12.50 (Papachristou et al., 2018, in prep.)

Μία διαφορετική εκτίμηση της ισχύος του πίδακα λόγω του AGN, στην οποία λαμβάνεται υπόψη και η εκπομπή στις ακτίνες-Χ βάσει της ροής ακτινοβολίας στατιστικού δείγματος γαλαξιών καλιμπραρισμένης από τη μονοχρωματική ροή ακτινοβολίας στα 178 MHz (Guillard et al., 2012; Punsly, 2005) είναι: $L_{kin}^{jet} = 3 \times 10^{45} ergs^{-1}$.

Δεδομένου ότι οι παραπάνω υπολογισμοί έγιναν για τη μικρής κλίμακας ραδιοφωνική εκπομπή (δηλαδή για το νεαρό ραδιο-πίδακα, βλ. Κεφάλαιο 1), οι παραπάνω τιμές αποτελούν τα κατώτερα όρια της ισχύος του ραδιο-πίδακα. Επομένως,

είναι πιθανό η ενεργητική αλληλεπίδραση του ραδιο-πίδακα με το ISM να επάγει τον κεντρικό άνεμο. Επίσης, υπέρ του ραδιο-πίδακα ως μηχανισμού τροφοδότησης του ανέμου συνηγορεί και το γεγονός ότι έχει ανακαλυφθεί απορρόφηση στο HI στα άκρα του ραδιολοβού (Morganti et al., 2013). Τα νέφη που δημιουργούν την απορρόφηση έχουν υψηλές ταχύτητες ($\sim 1000\,\mathrm{km\,s^{-1}}$), ένδειξη της επιτάχυνσής τους από το ραδιο-πίδακα. Όπως αναλύσαμε παραπάνω, ο κρύος κεντρικός άνεμος επιταχύνει μόνο ένα μικρό ποσοστό του αερίου του δίσκου. Αυτό μπορεί να συμβαίνει επειδή η ηλικία της μικρής κλίμακας ραδιο-εκπομπής (βλ., Κεφάλαιο 1), στην οποία αποδίδουμε την τροφοδότηση του ανέμου στη μέχρι τώρα συζήτηση, είναι μικρή ($t < 10^5 yrs$; Lister et al., 2003), επομένως μόνο ένα μικρό ποσό του CO του δίσκου έχει προλάβει να επηρεαστεί από το ραδιο-πίδακα.

Πίεση Ακτινοβολίας

Η ισχύς του AGN εκτιμάται ότι είναι: $L_{kin}^{AGN} = 5 \times 10^{45} ergs^{-1}$ (Dasyra et al., 2014). Σε αυτήν την περίπτωση η δύναμη που θα ασκείται στο αέριο λόγω πίεσης ακτινοβολίας θα είναι: $F = L_{kin}^{AGN}/c = 1.67 \times 10^{35} ergcm^{-1}$.
Ο ρυθμός μεταβολής της ορμής του ανέμου είναι: $\dot{M}_{out} V_{out} = 7.35 \times 10^{36} grcms^{-2}$.

Παρατηρούμε ότι η δύναμη που ασκεί η πίεση ακτινοβολίας λόγω του AGN στο αέριο είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη από το ρυθμό μεταβολής της ορμής του ανέμου, επομένως η πίεση ακτινοβολίας δεν είναι επαρκής μηχανισμός για να δημιουργήσει τον άνεμο.

Υπερκαινοφανείς

Μισή από την υπέρυθρη φωτεινότητα του 4C12.50 μπορεί να αποδοθεί στον AGN του και μισή σε αστρικές εκρήξεις (αστρογένεση, υπερκανοφανείς:"starburst") (Veilleux et al., 2009). Σε αυτήν την περίπτωση η εκτίμηση για το ρυθμό της αστρικής δημιουργίας (SFR) είναι: $SFR = 400\, M_{\odot}/yr$ (Kennicutt, 1998). Υποθέτοντας ότι για κάθε 100 ηλιακές μάζες που δημιουργούνται υπάρχει ένας υπερκαινοφανής (SNR=1%) που εκτοξεύει υλικό με κινητική ενέργεια $K_{SN} = 10^{51} erg$ μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ που απελευθερώνουν οι υπερκαινοφανείς:

$$L_{SN} = SNR \times SFR \times K_{SN} \Rightarrow L_{SN} = 1\% \times 400\, M_{\odot}/yr \times 10^{51} erg \\ \Rightarrow L_{SN} = 10^{44} ergs^{-1} \qquad [5.7]$$

Παρατηρούμε ότι $L_{kin}^{out} > L_{SN}$, επομένως η ενέργεια που απελευθερώνεται λόγω των υπερκαινοφανών δεν είναι επαρκής για να τροφοδοτήσει τον κεντρικό άνεμο.

5.0.5 Συμπέρασμα

Συνοψίζοντας, μέσω της ALMA ανίχνευσαμε μοριακό άνεμο σε εκπομπή, στην κεντρική περιοχή του κύριου/δυτικού πυρήνα του συστήματος 4C12.50. Ο μηχανισμός που δύναται να δημιουργήσει τον άνεμο είναι η αλληλεπίδραση του ραδιοπίδακα με το ISM. Γύρω από την κεντρική περιοχή, ανιχνεύσαμε δομές, οι οποίες πιθανώς σχετίζονται με ανέμους (αστρικούς ή λόγω του AGN).

Βιβλιογραφία

Batcheldor, D. κ.ά. (2007). «Dominant Nuclear Outflow Driving Mechanisms in Powerful Radio Galaxies». *ApJ* 661.70. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2007ApJ...661..70B.

Beuther, H. κ.ά. (2011). «The Coalsack near and far». *Astronomy & Astrophysics* 533.A17. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2011A%26A...533A..17B.

Corsini, E. M. (2014). «Counter-Rotation in Disk Galaxies». *ASP Conference Series* 486.51. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2014ASPC..486...51C.

Dasyra, K. M. και F. Combes (2011). «Turbulent and fast motions of H2 gas in active galactic nuclei». *A&A* 533.L10. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2011A%26A...533L..10D.

Dasyra, K. M. κ.ά. (2006). «Dynamical Properties of Ultraluminous Infrared Galaxies. I. Mass Ratio Conditions for ULIRG Activity in Interacting Pairs». *ApJ* 638.745. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2006ApJ...638..745D.

Dasyra, K. M. κ.ά. (2014). «Heating of the molecular gas in the massive outflow of the local ultraluminous-infrared and radio-loud galaxy 4C12.50». *A&A* 565.A46. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2014A%26A...565A..46D.

Dasyra, K.M. και F. Combes (2012). «Cold and warm molecular gas in the outflow of 4C 12.50». *A&A* 541.L7. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2012A%26A...541L...7D.

Downes, D. και P. M. Solomon (1998). «Rotating Nuclear Rings and Extreme Starbursts in Ultraluminous Galaxies». *ApJ* 507.615. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/1998ApJ...507..615D.

Fabian, A. C. (2012). «Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback». *ARA&A* 50.455. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2012ARA%26A..50..455F.

Fisher, D. (1998). «Basics of Radio Astronomy». *Jet Propulsion Laboratory Mission Execution and Automation Section Customer Integration Services Group* JPL D-13835. URL: https://www2.jpl.nasa.gov/radioastronomy/.

Guillard, P. κ.ά. (2012). «Strong Molecular Hydrogen Emission and Kinematics of the Multiphase Gas in Radio Galaxies with Fast Jet-driven Outflows». *ApJ* 747.95. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2012ApJ...747...95G.

Kennicutt, R. C. (1998). «The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies». *ApJ* 498.541. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/1998ApJ...498..541K.

Lister, M. L. κ.ά. (2003). «4C +12.50: A Superluminal Precessing Jet in the Recent Merger System IRAS 13451+1232». *ApJ* 584.135. URL: http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib_query?arXiv:astro-ph/0210372.

Lípari, S. κ.ά. (2004). «Infrared mergers and infrared quasi-stellar objects with galactic winds - I. NGC 2623: nuclear outflow in a proto-elliptical candidate». *MNRAS* 348.369. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2004MNRAS.348..369L.

Morganti, R. κ.ά. (2005). «Fast neutral outflows in powerful radio galaxies: a major source of feedback in massive galaxies». *A&A* 444.L9. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2005A%26A...444L...9M.

Morganti, R. κ.ά. (2013). «Radio Jets Clearing the Way Through a Galaxy: Watching Feedback in Action». *Science* 341.1082. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2013Sci...341.1082M.

Papachristou, M. κ.ά. (2018, in prep.).

Paraschos, G. (2017). «Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία». *Τμήμα Φυσικής, ΕΚΠΑ*.

Peng, C. Y. κ.ά. (2002). «Detailed Structural Decomposition of Galaxy Images». *The Astronomical Journal* 124.266. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2002AJ....124..266P.

Punsly, B. (2005). «An Independent Derivation of the Oxford Jet Kinetic Luminosity Formula». *ApJ* 623.L9. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2005ApJ...623L...9P.

Rodríguez-Zaurín, J. κ.ά. (2007). «A census of young stellar populations in the warm ULIRG PKS 1345+12». *MNRAS* 375.1133. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2007MNRAS.375.1133R.

Rupke, D. S. N. και S. Veilleux (2011). «Integral Field Spectroscopy of Massive, Kiloparsec-scale Outflows in the Infrared-luminous QSO Mrk 231». *ApJ* 729.L27. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2011ApJ...729L..27R.

Siemiginowska, A. κ.ά. (2008). «X-Ray Properties of the Gigahertz Peaked and Compact Steep Spectrum Sources». *ApJ* 684.811. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2008ApJ...684..811S.

Solomon, P. M. κ.ά. (1997). «The Molecular Interstellar Medium in Ultraluminous Infrared Galaxies». *ApJ* 478.144. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/1997ApJ...478..144S.

Stanghellini, C. κ.ά. (1997). «A VLBI study of GHz-peaked-spectrum radio sources. I. VLBI images at 6cm.» *A&A* 325.943. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/1997A%26A...325..943S.

Veilleux, S. κ.ά. (2009). «Spitzer Quasar and Ulirg Evolution Study (QUEST). IV. Comparison of 1 Jy Ultraluminous Infrared Galaxies with Palomar-Green Quasars». *ApJS* 182.628. URL: http://adsabs.harvard.edu/abs/2009ApJS..182..628V.

Shu, Frank H. (2010), Αστροφυσική-Δομή και Εξέλιξη του Σύμπαντος Τόμος Ι: ΑΣΤΕΡΕΣ, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο

Shu, Frank H. (2010), Αστροφυσική-Δομή και Εξέλιξη του Σύμπαντος Τόμος ΙΙ: ΓΑΛΑΞΙΕΣ - ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο

Carroll, B. W., and Ostlie, D. A. (2007) ,Modern Astrophysics, Pearson Adison-Wesley, San Francisco

Αντωνοπούλου Ε., Κοντιζά Μ. και Μαστιχιάδης Α. (2015), Αστρικά Συστήματα και Γαλαξίες: Σημειώσεις σύμφωνα με τις παραδόσεις των διδασκόντων, Αθήνα

Λιβανίου-Ροβίθη Ε., Νιάρχος Π. (2014), Σημειώσεις Παρατηρησιακής Αστροφυσικής, Αθήνα