

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ

**Μέτρηση μάζας γαλαξία μέσω γραμμών εκπομπής μεσοαστρικού αερίου:
Δυναμική μάζα και μάζα μοριακού αερίου.**

Επιμέλεια άσκησης
Καλλιόπη Δασύρα

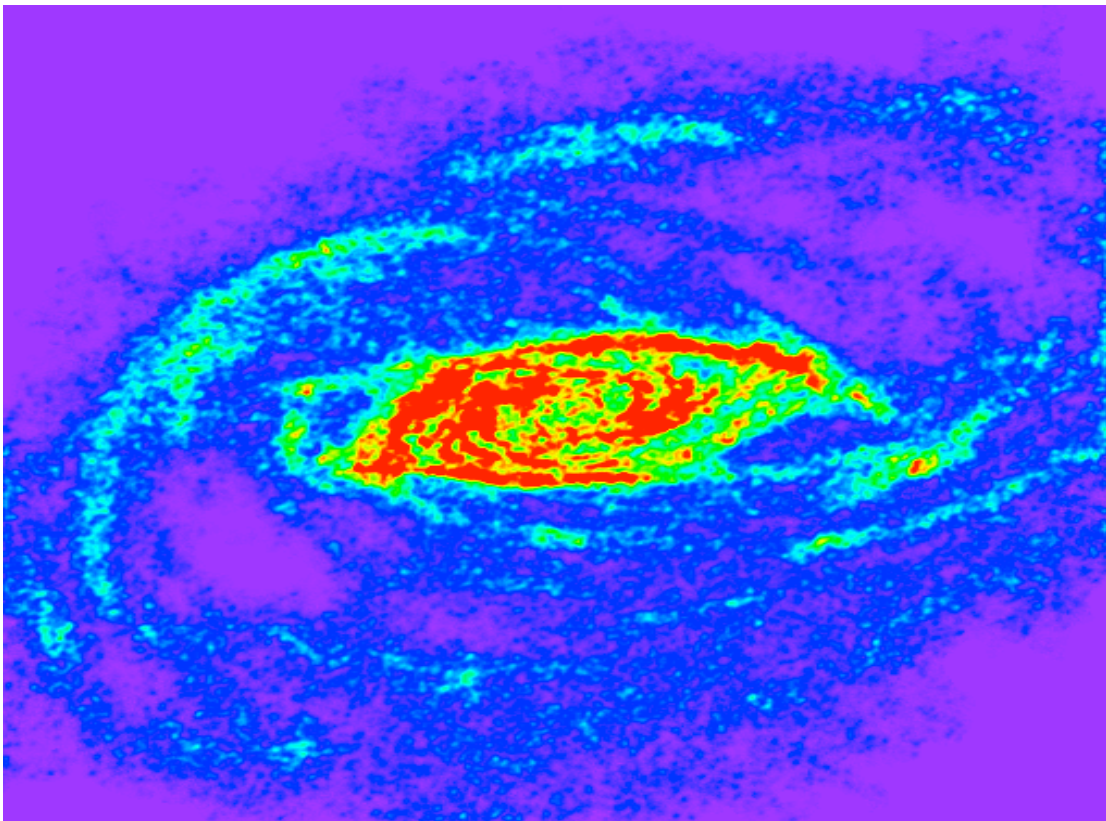


Figure 1 - Εικόνα του γαλαξία NGC5055 ή M63 στην γραμμή 21 εκατοστών του ατομικού υδρογόνου. Credit: THINGS team

Περιεχόμενα

1. Σκοπός άσκησης

2. Βασικά χαρακτηριστικά του γαλαξία υπό μελέτη

3. Βασικά στοιχεία για τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν

3.1 Δεδομένα ραδιοφωνικού μήκους κύματος από την συστοιχία αντεννών VLA

3.2 Δεδομένα μιλλιμετρικών μηκών κύματος από την αντέννα 30 μέτρων του IRAM

4. Θεωρητικό υπόβαθρο

4.1 Μοριακό και ατομικό αέριο

4.2 Κατανομή μάζας σε γαλαξίες

4.3 Καμπύλες περιστροφής γαλαξιών

4.4 Ένταση ακτινοβολίας μονοδειξίου του άνθρακα και μάζα του μοριακού αερίου

5. Βήματα

- Εξοικείωση με τα δεδομένα και το λογισμικό MAPPING του IRAM
- Δημιουργία παρατηρησιακής και θεωρητικής καμπύλης περιστροφής HI
- Μέτρηση δυναμικής μάζας
- Σύγκριση κινηματικής ατομικού - μοριακού αερίου
- Μέτρηση ροής μάζας μοριακού αερίου, σύγκριση με εγκλειστη μάζα.

6. Βιβλιογραφία

1. Σκοπός

Στόχος της άσκησης είναι η εξοικείωση με την εικόνα γαλαξία, όπως αυτή χαρτογραφείται από το μεσοαστρικό αέριο (ατομικό ή μοριακό). Θα μελετήσουμε την κατανομή και κινηματική αερίου σε έναν κοντινό γαλαξία, χρησιμοποιώντας μετρήσεις μεγάλων ραδιοτηλεσκοπίων. Θα δούμε πως να μετράμε τη μάζα ενός γαλαξία, και το ποσοστό της μάζας του βρίσκεται σε αέρια μορφή. Θα αναπαράγουμε ένα από τα πιο γνωστά πειράματα που ανέδειξαν την ανάγκη για την ύπαρξη σκοτεινής ύλης.

2. Βασικά χαρακτηριστικά του γαλαξία υπό μελέτη

Ο κοντινός μας γαλαξίας NGC5055, γνωστός και ως M63, είναι σε απόσταση $D=7.1$ Mpc ή $z=0.00167$, όπως προκύπτει από την ερυθρομετατόπιση φασματικών γραμμών. Σε αυτή την απόσταση, $1''$ στον ουρανό αντιστοιχεί σε 35 pc στο γαλαξία. Ο NGC5055 είναι πλούσιος σε αέριο που είναι κατανεμημένο σε δίσκο και σπείρες (γράφημα 1). Παρομοίως, τα αστέρια σχηματίζουν ένα δίσκο, σπείρες, αλλά και ένα ψευδοσφαιροειδές στον πυρήνα (γράφημα 2). Στο κέντρο βρίσκεται μια μαύρη τρύπα. Ο δίσκος κινείται προς εμάς δυτικά (δεξιά) του πυρήνα, και μακριά από εμάς ανατολικά (αριστερά) του πυρήνα (γράφημα 3). Ο άξονας περιστροφής του δίσκου σχηματίζει γωνία $\sim 50^\circ$ με την ευθεία παρατήρησης.



Figure 2 – Εικόνα του γαλαξία NGC5055 σε οπτικά μήκη κύματος από το τηλεσκόπιο οκτώ μέτρων Subaru (Credit: S. Miyazaki).

3. Βασικά στοιχεία για τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν

3.1 Δεδομένα ραδιοφωνικού μήκους κύματος από την συστοιχία αντεννών VLA

Ο γαλαξίας NGC5055 παρατηρήθηκε με τη μεγάλη συστοιχία ραδιοφωνικών αντεννών, Very Large Array (VLA). Το VLA αριθμεί 27 αντένες 25 μέτρων η καθε μία. Έχει φτιαχτεί από το U.S. National Radio Astronomical Observatory στο Νέο Μεξικό (ΗΠΑ).

Οι παρατηρήσεις αφορούσαν στην γραμμή 21 εκατοστών (1420.40 MHz) που οφείλεται στη μετάβαση υπέρλεπτης υφής ατόμων υδρογόνου. Τα δεδομένα ανακτήθηκαν για το project The HI Nearby Galaxy Survey (THINGS). Παρουσιάστηκαν από τους de Block et al. (2012), και βρίσκονται στο site <http://www2.mpia-hd.mpg.de/THINGS/Data.html>.

Οι χάρτες εκπομπής και ταχύτητας που φτιάχτηκαν από αυτά τα δεδομένα φαίνονται στα γραφήματα 1 και 3, αντίστοιχα.

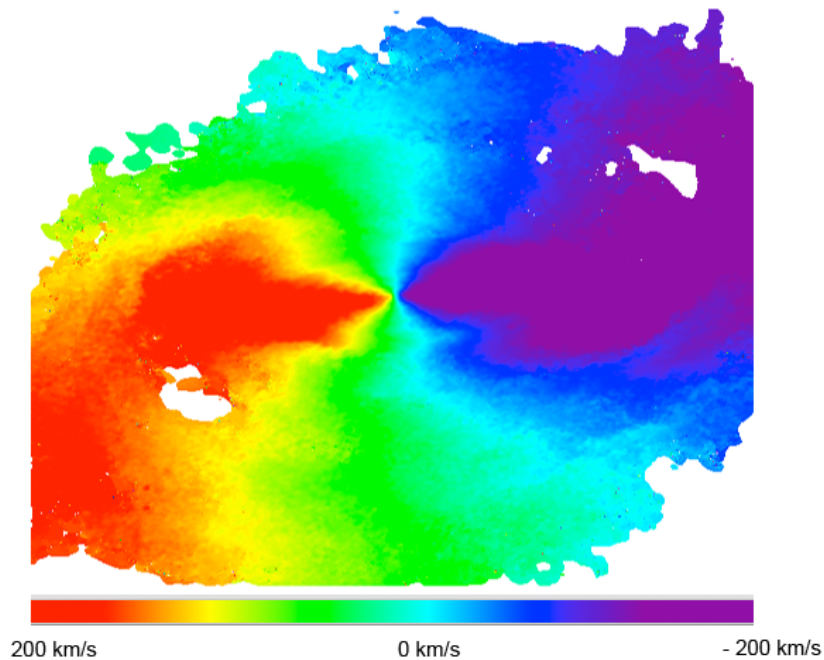


Figure 3 - Ταχύτητα περιστροφής του δίσκου ατομικού υδρογόνου στον NGC5055.



Figure 4 – Οι 27 αντένες του Very Large Array.

3.2 Δεδομένα μιλλιμετρικού μήκους κύματος από την αντέννα 30 μέτρων του IRAM

Τα δεδομένα για το μοριακό αέριο προέρχονται από το τηλεσκόπιο 30 μέτρων του Institut de Radioastronomie Millimetrique (IRAM) στην Sierra Nevada της Ισπανίας (γράφημα 5). Οι δέκτες ρυθμίστηκαν ώστε να παρατηρήσουν τη γραμμή εκπομπής μονοξειδίου του άνθρακα CO(2-1), λόγω μετάπτωσης ηλεκτρονίων σε μόρια του μεσοαστρικού χώρου του γαλαξία από την 2η περιστροφική στάθμη στην 1η περιστροφική στάθμη του μορίου. Η συχνότητα αυτής της μετάβασης (στο σύστημα ηρεμίας) είναι στα 230.542 GHz.

Χαρτογράφηση του γαλαξία μέσω πολλαπλών εκθέσεων σε γειτονικές θέσεις έδωσε εικόνες εκτός από φάσματα για το μοριακό αέριο, παρόμοια με αυτά που φαίνονται στα γραφήματα 1 και 3 για το ατομικό αέριο από τη ραδιοσυστοιχία. Τα δεδομένα CO(2-1) ανακτήθηκαν για το consortium The HERA CO-Line Extragalactic Survey (HERACLES) και είναι διαθέσιμα στο site <http://www.mpia.de/HERACLES/Data.html>.

Η γραμμή που συνηθίζεται να παρατηρείται είναι η CO(1-0), η οποία προέρχεται από μεταβάσεις ηλεκτρονίων από την πρώτη στη βασική περιστροφική στάθμη των μορίων. Η γραμμή αυτή δεν ήταν παρατηρήσιμη στην προκειμένη περίπτωση γιατί η συχνότητά της συνέπεσε με γραμμές απορρόφησης (άλλων) μορίων στη Γήινη ατμόσφαιρα. Για το σκοπό της άσκησης, θα υποθέσουμε ότι το μεσοαστρικό αέριο του γαλαξία είναι σε τοπική θερμοδυναμική ισορροπία (LTE) κι ότι η μονοχρωματική ροή στην κορυφή της γραμμής CO(1-0), από το νόμο Rayleigh-Jeans (και την αντίστοιχη θερμοκρασία φωτεινότητας), είναι ίση με $\nu_{(1-0)}^2 \text{CO}(1-0) / \nu_{(2-1)}^2 \text{CO}(2-1) = (115,271/230,542)^2 = 1/4$ της μονοχρωματικής ροής στη κορυφή της CO(2-1). Παρομοίως, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η χωρική κατανομή του αερίου που ανιχνεύεται στις δυο μεταβάσεις είναι η ίδια.



Figure 5 - Το τηλεσκόπιο 30 μέτρων του IRAM.

4. Θεωρητικό υπόβαθρο

4.1 Μοριακό και ατομικό αέριο.

Στο μεσοαστρικό χώρο γαλαξιών, το ατομικό αέριο είναι πιο διάχυτο από ότι το μοριακό: στους πυρήνες, η δημιουργία μορίων είναι ευκολότερη λόγω μεγάλης πυκνότητας (με τις αντιδράσεις να υποβοηθούνται λόγω κατάλυσης στην επιφάνεια κόκκων σκόνης), ενώ σε πιο αραιές περιοχές, οι ακτίνες X ή γ διεισδύουν πιο βαθιά σε νέφη καταστρέφοντας μόρια και ιονίζοντας άτομα που είναι εκτεθημένα σε αυτές. Για το λόγο αυτό, το ατομικό αέριο είναι κατανεμημένο σε αρκετά μεγαλύτερες αποστάσεις από το μοριακό αέριο, και είναι καλύτερο για την δυναμική μελέτη γαλαξιών. Στις παρακάτω ασκήσεις θα δούμε σαν παράδειγμα τη διαφορά για τον γαλαξία NGC5055.

Το πιο σύνηθες στοιχείο στο Σύμπαν είναι το υδρογόνο, που κυριαρχεί τη μάζα είτε της ατομικής είτε της μοριακής κατάστασης. Η συνολική μάζα του ατομικού υδρογόνου σε έναν γαλαξία μπορεί να είναι παρόμοια με αυτή του μοριακού παρά τη μικρότερη πυκνότητα, λόγω του μεγαλύτερου όγκου που καταλαμβάνει. Ενώ το κρύο H₂ ανιχνεύεται στην γραμμή 21 εκ., οι μεταβάσεις του H₂ έχουν υψηλότερες ενέργειες διέγερσης (που αντιστοιχούν σε T>400K), και δεν ανιχνεύουν κρύο αέριο της τάξεως των 10K που είναι ικανό να δημιουργήσει νέα άστρα μέσω της βαρυτικής κατάρρευσης. Αυτό ανιχνεύεται μέσω γραμμών εκπομπής του δευτέρου πιο συνήθους μορίου στο Σύμπαν, του CO. Η μάζα του H₂ βρίσκεται αναγωγικά, μέσω του πηλίκου μαζών H₂/CO στο Γαλαξία μας (βλέπε Bolatto et al. 2013). Ωστόσο, για να βρεθεί η μάζα του CO, πρέπει να αντιστοιχηθεί η επιφανειακή λαμπρότητα των νεφών στην εσωτερική τους μάζα (δηλ. όχι μόνο στη μάζα της επιφάνειας που βλέπουμε καθώς είναι οπτικά βαθιά – βλέπε ενότητα 4.4).

Γενικεύοντας και σε άλλα μόρια (π.χ., HCN) και άτομα (π.χ. ιόντα Fe), το μοριακό αέριο είναι πολύ πιο πυκνό από το ατομικό αέριο. Η μεταξύ τους διαφορά πυκνοτήτων είναι συχνά 10 τάξεις μεγέθους (από 10⁻⁵/εκ.³ για αραιό ιονισμένο αέριο στο μεσογαλαξιακό χώρο, σε 10⁷ / εκ.³ για μοριακό αέριο στους πυκνούς πυρήνες όπου δημιουργούνται νέα άστρα). Παρότι δηλαδή κι οι δύο φάσεις είναι αέριες, η διαφορά στην πυκνότητά τους είναι μεγαλύτερη π.χ., από αυτήν στον αέρα και σε βότσαλα στη Γη.

4.2 Κατανομή μαζας σε γαλαξίες.

Το αέριο είναι κυριώς κατανεμημένο σε δίσκο: λόγω δυναμικής τριβής και γρήγορης ψύξης μέσω ακτινοβολίας, διαταραχές της κατανομής του αερίου παρέρχονται και ο δίσκος (ξανα-)σχηματίζεται μέσα σε λίγους δυναμικούς χρόνους (=χρόνος περιστροφής ενός γαλαξία γύρω από τον εαυτό του). Η εκπομπή του συχνά ακολουθεί μια εκθετική κατανομή του τύπου: $I_{CO} = I_{CO}(0) e^{-R/R_{scalelength}}$ όπου R είναι η απόσταση, $I_{CO}(0)$ είναι η τιμή στο κέντρο του εκάστοτε γαλαξία και $R_{scalelength}$ είναι μια χαρακτηριστική ακτίνα της κατανομής που δείχνει πόσο γρήγορα πέφτει το εκθετικό καθώς η απόσταση από το κέντρο μεγαλώνει. Υπολογίζεται από φωτομετρία δεδομένων, π.χ., Sofue (1990). Για δίσκο, ισχύει ότι $R_{scalelength} = R_{eff} / 1.69$ {μπορείτε να το αποδείξετε}, εφόσον R_{eff} είναι η ακτίνα που συμπεριλαμβάνει το μισό αστρικό φως. Η R_{eff} είναι γνωστή και ως ενεργός ακτίνα.

Η εκπομπή των αστεριών, στη περίπτωση δίσκου, ακολουθεί ένα εκθετικό παρόμοιου τύπου (με διαφορετικό όμως $R_{scalelength}$). Στη περίπτωση σφαιροειδούς, η κατανομή των

αστεριών περιγράφεται από το λεγόμενο προφίλ de Vaucouleurs που αυξάνει με την απόσταση σαν $\sim R^{1/4}$. Και οι δύο κατανομές περιγράφονται από το γενικευμένο προφίλ Sérsic που έχει τη μορφή $I=I_0 e^{-\beta (R/R_{\text{eff}})^{1/n}}$, όπου β είναι μια σταθερά, $n=1$ για δίσκο και 4 για σφαιροειδές. Αυτές οι κατανομές μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας και για τη μάζα, με την παραδοχή ενός σταθερού πηλίκου λαμπρότητας/μάζας σε κάθε γαλαξία.

Η σκοτεινή ύλη είναι κατανεμημένη σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις απ'ότι η ορατή ύλη (αστέρια, αέριο). Τυπικά, έχει αμελητέα επιρροή στην κινηματική γαλαξιών σε αποστάσεις <1 kpc από το κέντρο, και σημαντική επιρροή σε ακτίνες μεγαλύτερες των 3 ενεργών ακτίνων. Αναφορά για την κατανομή της είναι το μοντέλο NFW (Navarro, Frenk, & White, 1996). Η σκοτεινή ύλη μπορεί να σταματάει σε ακτίνες τάξεως 50 kpc. Περισσότερες πληροφορίες για την κατανομή μάζας και την κινηματική γαλαξιών μπορούν να βρεθούν στο βιβλίο των Binney & Tremaine "Galactic Dynamics".

4.3 Καμπύλες περιστροφής γαλαξιών

Η καμπύλη περιστροφής είναι ένα γράφημα που δείχνει την κυκλική ταχύτητα ενός γαλαξία σαν συνάρτηση της απόστασής από το κέντρο. Παρατηρησιακά, η κυκλική ταχύτητα μετράται από την μετατόπιση φασματικών γραμμών σε σχέση με τη συχνότητα την οποία θα είχαν εάν η ταχύτητά τους ήταν ίδια με την μέση ταχύτητα του γαλαξία αναφορικά με εμάς. Ένα γνωστό παράδειγμα δίνεται στο γράφημα 6.

Η καμπύλη αυτή μας είναι χρήσιμη διότι είναι εύκολο να τη συγκρίνουμε με αναλυτικές λύσεις για τη κινηματική των αστεριών ή του αερίου υποθέτοντας κυκλικές ταχύτητες, $V_{\text{circ}}=[G M(R)/R]^{1/2}$, και της κατανομής μάζας $M(R)$ του υπό μελέτη γαλαξία (βλ. παράγραφο 4.2). Πώς συμπεριφέρεται στα όρια; Σε μικρές ακτίνες, η περιστροφή μπορεί συχνά να προσεγγιστεί από αυτή στερεού σώματος (συμπαγούς δίσκου), οπότε λόγω διατήρησης της γωνιακής ταχύτητας $\omega=\delta\theta/\delta t=R\delta\theta/(R\delta t)=V_{\text{circ}}/R$, η κυκλική ταχύτητα είναι ανάλογη του R . Σε μεγάλες ακτίνες, η κυκλική ταχύτητα για ορατή μόνο ύλη, θα έπρεπε να προσεγγίζεται από το Κεπλεριανό όριο, $V_{\text{circ}}\sim 1/R^{1/2}$. Η διαφορά ανάμεσα στην προβλεφθείσα τιμή και τις μετρήσεις για μεγάλα R φαίνεται στο γράφημα 6.

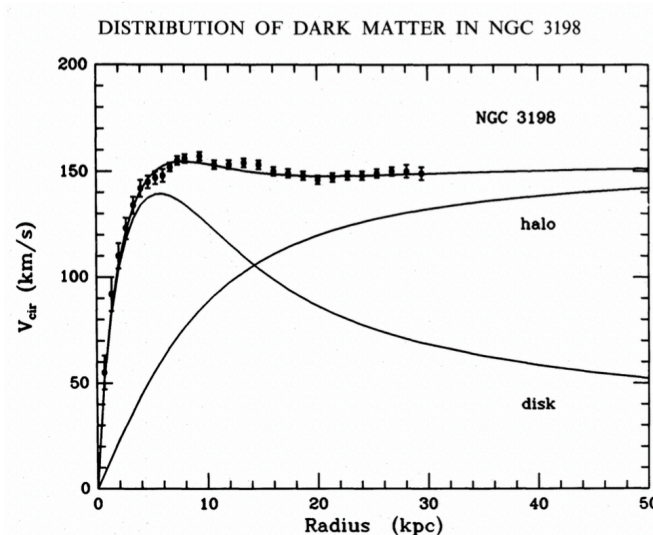


Figure 6 - Καμπύλη περιστροφής του γαλαξία NGC3198 (van Albada et al. 1995)

4.4 Ένταση ακτινοβολίας μονοξειδίου του άνθρακα και μάζα του μοριακού αερίου

Για οπτικά ρηχό αέριο, μπορούμε κάθε φωτόνιο που λαμβάνουμε να το αντιστοιχήσουμε σε ένα άτομο ή μόριο που το εξέπεμψε και γνωρίζοντας τον αριθμό των ατόμων ή μορίων και το βάρος τους να βρούμε τη συνολική μάζα αερίου. Στη διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει μια διόρθωση για το οπτικό βάθος αρκεί αυτό να είναι <1 , ώστε να μπορούμε να λαμβάνουμε φωτόνια από όλες τις στρώσεις ενός νέφους. Τι συμβαίνει όμως σε μεγάλα οπτικά βάθη, από τα οποία δεν μπορούμε να λάβουμε φωτόνια, δηλ, δεν έχουμε πρόσβαση στην εκπομπή κάποιων στρώσεων; Πώς λοιπόν μετράμε τη μάζα μοριακών νεφών; Η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω.

Η συνολική λαμπρότητα ενός αντικειμένου δίνεται από τον τύπο $L = 4\pi D^2 \int I_\nu d\Omega$, όπου D είναι η απόσταση του αντικειμένου, I_ν είναι η ένταση ακτινοβολίας ανά συχνότητα και $d\Omega$ είναι η στερεά γωνία. Το $d\Omega$, για μικρές γωνίες, είναι ίσο με π^2/D^2 , όπου r είναι η ακτίνα της υπό μελέτη πηγής. Για σώμα σε τοπική θερμοδυναμική ισορροπία, το I_ν δίνεται από τη συνάρτηση Planck (ή τον πιο απλό τύπο Rayleigh-Jeans για μεγάλα μήκη κύματος), $I_\nu = 2\nu^2 k_B T_{bb}/c^2$, όπου k_B είναι η σταθερά του Boltzmann, T_{bb} η θερμοκρασία μελανού σώματος, και c η ταχύτητα του φωτός. Ο ίδιος τύπος ισχύει και για το συνεχές και για γραμμές εκπομπής. Το $d\nu$ της ολοκλήρωσης μπορεί να εκφραστεί και σαν dV λόγω της σχέσης Doppler που συνδέει τη συχνότητα με τη ταχύτητα: $dV = c(\nu_0 - \nu)/\nu$, όπου ν_0 είναι η συχνότητα αναφοράς. Οπότε, το ολοκλήρωμα της έντασης στην συχνότητα αντιστοιχεί σε ολοκλήρωμα της θερμοκρασίας στην ταχύτητα. Λαμβάνοντας υπ' όψην όλα τα παραπάνω, έχουμε ότι $L \sim T \Delta V r^2$.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι το αντικείμενο αυτό είναι ένα νέφος μοριακού αερίου που εκπέμπει σε μια γραμμή CO. Για να είναι ένα τέτοιο νέφος σταθερό και να μην καταρρέει ή διασπάται, πρέπει να ισχύει για αυτό το θεώρημα Virial. Οπότε οι θερμικές ταχύτητες των μορίων μέσα στο νέφος θα δίνονται από τον τύπο $\Delta V = (GM/r)^{1/2}$. Συνδυάζοντας αυτόν τον τύπο με τον παραπάνω τύπο της λαμπρότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αερίου, έχουμε ότι $L / (T r^2) \sim (GM/r)^{1/2}$. Εκφράζοντας επιπλέον τη μάζα μέσω πυκνότητας, $M = \rho (4/3\pi r^3)$, βρίσκουμε ότι $M \sim L_{CO} (\rho/G)^{1/2}/T$.

Βλέπουμε λοιπόν ότι η μάζα ενός νέφους εξαρτάται γραμμικά από την λαμπρότητα της επιφάνειάς του και το γινόμενο $\rho^{1/2}/T$. Με την προϋπόθεση ότι η κατανομή πυκνοτήτων και θερμοκρασιών των μοριακών νεφών είναι παρόμοιες στους γαλαξίες, χρησιμοποιούμε μια χαρακτηριστική τιμή του γινομένου που έχει μετρηθεί για το δικό μας Γαλαξία. (Η υπόθεση αυτή είναι λογική διότι μεγάλες αποκλίσεις είτε στη μία είτε στην άλλη παράμετρο θα οδηγούσαν στην κατάρρευση ή στη διάσπαση των νεφών.) Η αναγωγή γίνεται μέσω ενός πολλαπλασιαστικού παράγοντα της λαμπρότητας (στις μονάδες $K \text{ km/s}$ όπως στην προαναφερθείσα σχέση με τη μάζα). Ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας ονομάζεται α_{CO} κι η Γαλαξιακή του τιμή είναι $4.6 M_\odot / (K \text{ km/s pc}^2)$ κι έχει βρεθεί για την εκπομπή από τη γραμμή CO(1-0).

Η ακριβής αντικατάσταση παραμέτρων και σταθερών σε αυτούς τους τύπους δίνει τον τελικό τύπο για τον υπολογισμό της μάζας μοριακού αερίου από τη μετρηθείσα ένταση:

$$M(H_2) = 3.25 \cdot 10^7 \alpha_{CO} I_{CO(1-0)} \Delta V D^2 / ((1+z) v_{CO(1-0)}^2),$$

όπου z είναι η ερυθρομετατόπιση του γαλαξία, και $v_{CO(1-0)}$ είναι η συχνότητα της γραμμής στο σύστημα ηρεμίας σε μονάδες GHz, δηλ. 115,271 GHz. Οι μονάδες του $I_{CO(1-0)}$ ΔV είναι Jy km/s, του D σε Mpc, του M σε ηλιακές μάζες (Solomon et al. 1998). Σε εξωτερικούς γαλαξίες η σχέση αυτή μας δίνει τη συνολική ανιχνεύσιμη μάζα του μοριακού αερίου, εφ' όσον η εκπομπή προέρχεται από το σύνολο πολλών νεφών.

**SOS: Για να συνδεθούμε στον Η/Υ με data:
ssh -p 65001 -Y students@88.197.83.154
δίνουμε password που δίνεται στην τάξη και
μετά γράφουμε lab**

5. Βήματα των ασκήσεων

5.1 Εξοικείωση με το format των δεδομένων & το λογισμικό MAPPING του IRAM

Τα δεδομένα τα οποία θα δούμε είναι «κύβος», δηλ. έχουμε τη διδιάστατη εικόνα της χωρικής κατανομής της ροής για κάθε συχνότητα ή το φάσμα κάθε σημείου της εικόνας. Επειδή τα φάσματα έχουν την ίδια συχνότητα αναφοράς κι επειδή η ταχύτητα συνδέεται με τη συχνότητα, έχουμε μια εικόνα για κάθε ταχύτητα. Αν αφαιρέσουμε από τη συνολική ταχύτητα την κοσμολογική ταχύτητα απομάκρυνσης του εκάστοτε γαλαξία από εμάς, γνωστή και ως συστημική ταχύτητα, τότε οι εναπομείνουσες ταχύτητες δείχνουν πώς κινείται το αέριο αναφορικά με το κέντρο του γαλαξία.

Το λογισμικό MAPPING του IRAM, μπορεί να μας δείξει τα δεδομένα κατευθείαν σαν συνάρτηση της ταχύτητας (σε σχέση με την συστημική ταχύτητα του γαλαξία σε κάθε γραμμή). Ένα τέτοιο παράδειγμα βλέπουμε στο γράφημα 7 για τον υπό μελέτη γαλαξία στη φασματική γραμμή CO(2-1). Η ταχύτητα εδώ υπολογίστηκε σαν $c[v_{CO(2-1)}-v]/v$.

Για να φορτώσουμε τα δεδομένα κάνουμε τις εξής κινήσεις.

(1) Ξεκινάμε το πρόγραμμα MAPPING. Αυτό θα μας βγάλει κάποια παράθυρα, ένα εκ των οποίων είναι το τερματικό.

(2) Στο τερματικό, πατάμε:

```
MAPPING> let name NGC5055_CO21_lab
```

```
MAPPING> let type lmv εάν θέλουμε να φορτώσουμε τα δεδομένα για το CO(2-1) ή
```

```
MAPPING> let name NGC5055_HI_lab
```

```
MAPPING> let type lmv-clean εάν θέλουμε να φορτώσουμε τα δεδομένα για το HI.
```

Συνεχίζουμε πατώντας

```
MAPPING> go view
```

Τώρα έχουμε πλέον φορτώσει τα δεδομένα (βλέπε παράθυρο GREG σχήματος 8).

(3) Στο παράθυρο GREG, τώρα βλέπουμε την εικόνα του γαλαξία σε μία από τις συχνότητες των παρατηρήσεων (panel πάνω αριστερά). Κάνοντας αριστερό κλικ στα διάφορα σημεία του γαλαξία, παίρνουμε το φάσμα (δηλ. την ένταση της ακτινοβολίας σαν συνάρτηση της συχνότητας) στο panel πάνω δεξιά. Αντιστρόφως, εάν πάμε στο panel πάνω δεξιά, και κάνουμε αριστερό κλικ σε κάποια διαφορετική συχνότητα, θα πάρουμε την εικόνα του γαλαξία στην καινούρια συχνότητα.

NGC5055 CO21

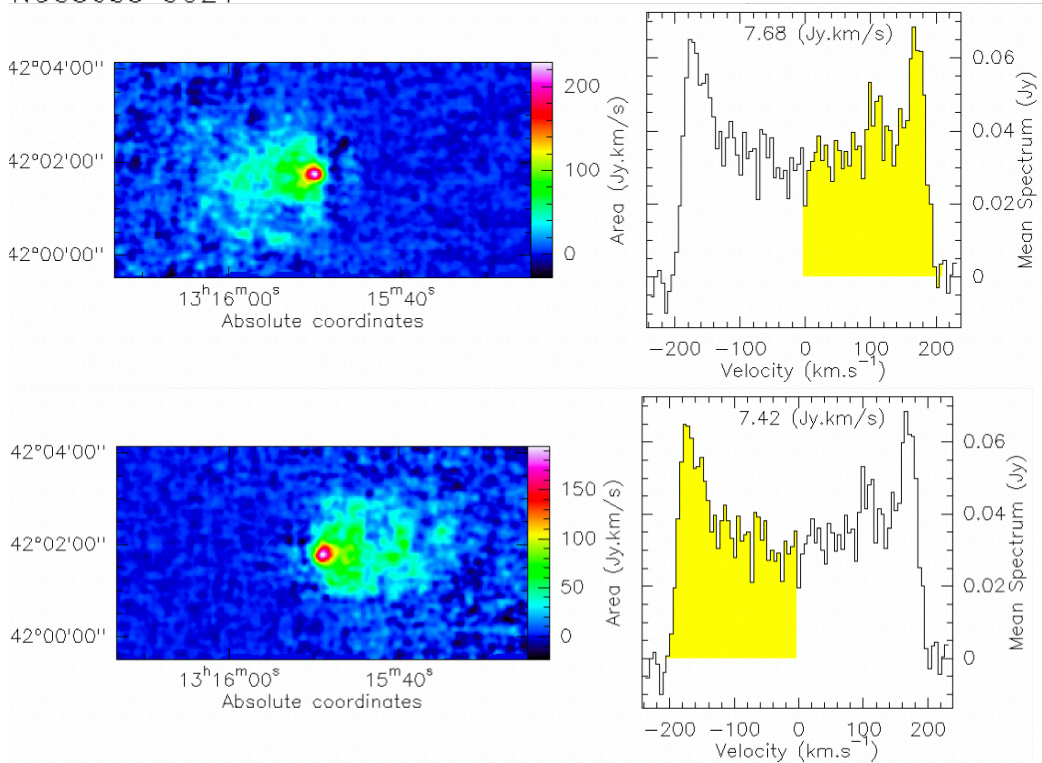


Figure 7 - Δεξιά: Φάσμα του γαλαξία NG5055 στην γραμμή εκπομπής CO(2-1), σαν συνάρτηση της συστημικής του ταχύτητας (κι άρα της ταχύτητας από το κέντρο του). Αριστερά: Εικόνα του γαλαξία στην ίδια γραμμή, για τα εύρη ταχυτήτων που είναι μαρκαρισμένα με κίτρινο στα φάσματα. Παρατηρούμε το δεξί κομμάτι του δίσκου που μας πλησιάζει, και το αριστερό κομμάτι που απομακρύνεται από εμάς.

Στο panel κάτω αριστερά, βλέπουμε το ολοκλήρωμα της εικόνας στη συχνότητα. Δηλαδή, σε κάθε χωρικό σημείο, βλέπουμε το άθροισμα της έντασης ακτινοβολίας για όλες τις συχνότητες. Τα όρια της ολοκλήρωσης μπορούμε να τα αλλάξουμε, κάνοντας 2 διαδοχικά αριστερά κλικ στο panel κάτω δεξιά, ένα στο κάτω κι ένα στο άνω όριο. Εδώ, η συχνότητα έχει αυτόματα μετατραπεί σε ταχύτητα (όπως είδαμε και στο γράφημα 7), δίνοντάς μας τη δυνατότητα να ολοκληρώσουμε εντός χρήσιμων κινηματικών ορίων. Αντιστρόφως, το φάσμα που φαίνεται στο panel κάτω δεξιά είναι ολοκληρωμένο σε ολόκληρη την εικόνα. Εάν θέλουμε να ολοκληρώσουμε το φάσμα μιας συγκεκριμένης υπο-περιοχής, τότε κάνουμε πρώτα δεξί κλικ στο panel κάτω αριστερά και κατόπιν πολλαπλά αριστερά κλικ για να ορίσουμε το περίγραμμα της περιοχής της οποίας θέλουμε το δούμε το φάσμα.

(4) Εάν πατήσουμε πρώτα s (για 'slice') και μετά δυο διαδοχικά αριστερά κλικ σε 2 διαφορετικά σημεία της εικόνας, παίρνουμε έναν καινούριο χάρτη που μας δείχνει την ένταση του αερίου σαν συνάρτηση της ταχύτητας (ψ άξονας) και σαν συνάρτηση της θέσης πάνω στην ευθεία που μόλις ορίσαμε (χ άξονας - όπου η απόσταση μετράται σε arcsecond). Ουσιαστικά, αυτό το γράφημα μας επιτρέπει να δούμε σε ποια ταχύτητα έχουμε την μέγιστη εκπομπή κατά μήκος της ευθείας. Στο παράδειγμα του γραφήματος 8 η ευθεία ορίστηκε να είναι παραπλήσια με τον άξονα του δίσκου. Το παράδειγμα είναι ενδεικτικό της καμπύλης περιστροφής του αερίου στα πρώτα 3 kpc του NGC5055.

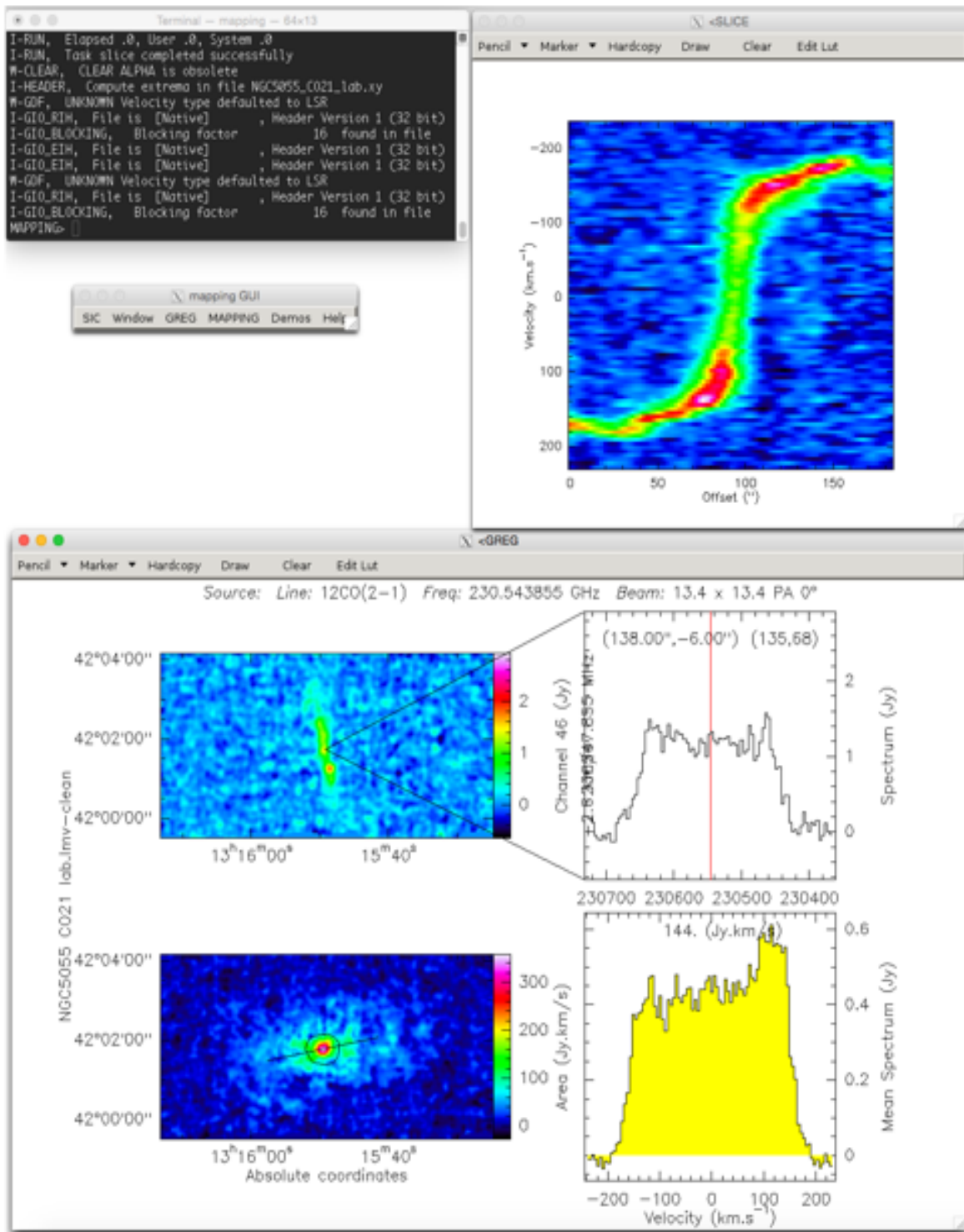


Figure 8 - Παράδειγμα χρήσης του προγράμματος MAPPING για την εξέταση φασματοφωτομετρικών δεδομένων και την εξαγωγή κινηματικών παραμέτρων.

Πρώτο μέρος άσκησης

a) Δημιουργία καμπύλης περιστροφής HI

- Κάντε την καμπύλη περιστροφής για το ατομικό αέριο σε 3 kpc από το κέντρο του NGC5055, χρησιμοποιώντας μια ευθεία στο επίπεδο του δίσκου του. Κατόπιν, αυξήστε σταδιακά την απόσταση που χρησιμοποιείτε για το σκοπό αυτό. Δημιουργείτε την καμπύλη περιστροφής για το ατομικό αέριο μέχρι 30 kpc από το κέντρο του γαλαξία (στο ίδιο γράφημα – οι δύο κλιμακες δίνονται για ακρίβεια στη μέτρηση). Λάβετε υπ' όψη ότι ο δίσκος στον NGC5055 είναι κεκλιμένος αναφορικά με την ευθεία παρατήρησής μας. Η βαρυτική σταθερά G είναι $4.3 \cdot 10^{-3} \text{ pc (km/s)}^2 / M_{\odot}$. Ποιοι μηχανισμοί εξηγούν τη συνάρτηση που βλέπουμε;

- Εάν υποθέσουμε ότι τόσο το αέριο όσο και τα αστέρια κατανομούνται σε ένα εκθετικό δίσκο με χαρακτηριστική ακτίνα 3.4 kpc (Battaglia et al. 2006), άρα $I \sim I_0 e^{-R/3.4 \text{ kpc}}$, ποια θα είναι η θεωρητική καμπύλη περιστροφής του γαλαξία; Τι συμπεράσματα βγάζουμε από τη σύγκριση των δύο καμπυλών; {έστω ότι η αστρική μάζα είναι $8 \cdot 10^{10} M_{\odot}$, Jovanovich 2017}.

{Προσοχή: θα πρέπει να χρησιμοποιήσετε την ολοκληρωμένη μάζα σε κάθε ακτίνα του γαλαξία, όχι την μάζα ενός δακτυλιδιού στην εκάστοτε ακτίνα. Για το λόγο αυτό κάντε πρώτα και τα γραφήματα που να δείχνουν το $M(R)$ και το $M_{\text{total}}(R)$ συναρτήσεως του R . Την ολοκλήρωση πραγματοποιήστε την σε 2 διαστάσεις, σε κυλινδρικές συντεταγμένες, θεωρώντας συμμετρία κατά την περιστροφή του άξονα.

b) Μέτρηση δυναμικής μάζας

- Η δυναμική μάζα είναι η συνολική μάζα που είναι εγκεκλεισμένη σε κάποια τροχιά, ανεξαρτήτως κατανομής ή συνιστώσας της ύλης (φωτεινή, σκοτεινή). Χρησιμοποιείτε τις πιο εξωτερικές τροχιές για να την μετρήσετε.

Δεύτερο μέρος άσκησης

a) Σύγκριση με την κινηματική του μοριακού αερίου

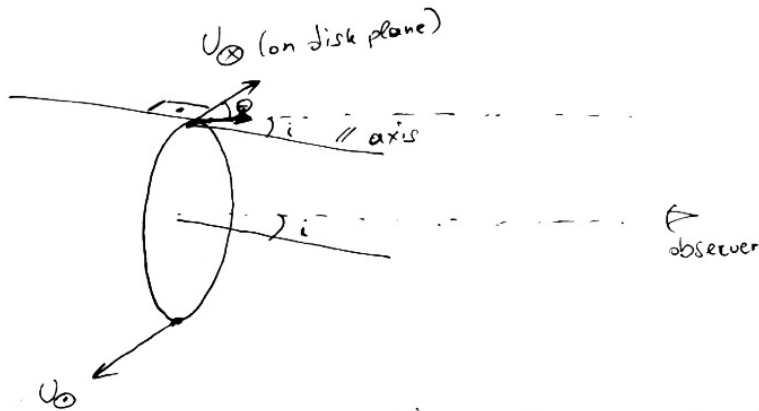
- Πόσο μακριά μπορούμε να δημιουργήσουμε την καμπύλη περιστροφής για το πυκνό, μοριακό αέριο; Τι δυναμική μάζα βγάζουμε μέσω αυτού; Αρκεί για να διαπιστώσουμε την αναγκαιότητα ύπαρξης σκοτεινής ύλης σε αυτόν το γαλαξία;

b) Μέτρηση ροής CO(2-1) και μοριακής μάζας

- Μετρήστε την ένταση της εκπομπής CO(2-1), και χρησιμοποιείτε τον τύπο της παραγράφου 4.4 για τον υπολογισμό της μάζας του μοριακού αερίου. Υποθέστε πως τα μοριακά νέφη είναι σε τοπική (μερική) θερμοδυναμική ισορροπία.

- Τι ποσοστό της μάζας του NGC5055 βρίσκεται σε (πυκνή) αέρια μορφή;

Σημείωση 1:



$$U_{\text{los}} = U \cos \theta = U \cos(90^\circ - i) = U \sin i$$

$$\Rightarrow U = \frac{U_{\text{los}}}{\sin i}, \text{ where } i \equiv \text{inclination (angle between axis of rotation and line of sight)}$$

Σημείωση 2:

$$M_{\text{tot}} = \int_0^{2\pi} \int_0^r r \rho(r) d\theta dr = 2\pi M_0 \int_0^r r e^{-\frac{r}{r_0}} dr = M_0 2\pi (r_0)^2 \int_0^{\frac{r}{r_0}} \frac{r}{r_0} e^{-\frac{r}{r_0}} d\frac{r}{r_0} =$$

$$M_{\text{tot}} = M_0 2\pi (r_0)^2 \int_0^{\frac{r}{r_0}} x e^{-x} dx = M_0 2\pi r_0^2 \left[-e^{-x}(x+1) \right]_0^{\frac{r}{r_0}} = M_0 2\pi r_0^2 \left[e^{-\frac{r}{r_0}} \left(\frac{r}{r_0} + 1 \right) - e^0 \right]$$

$$\Rightarrow M_{\text{tot}} = M_0 2\pi r_0^2 \left[1 - e^{-\frac{r}{r_0}} \left(1 + \frac{r}{r_0} \right) \right]$$

και για την "ενεργη" ακτίνα r_{eff} όπου εκπέμπεται φως ή κόσμος:

$$M_0 = \frac{M_{\text{tot}}/2}{2\pi r_0^2 \left[1 - e^{-\frac{r_{\text{eff}}}{r_0}} \left(1 + \frac{r_{\text{eff}}}{r_0} \right) \right]} \quad \text{Δεδομένου ότι } r_{\text{eff}} = 1.69 r_0 \text{ (από το } \cos \theta \text{)}$$

$$M_0 = \frac{M_{\text{tot}}}{4\pi r_0^2 \left[1 - e^{-1.69} \cdot 2.69 \right]}$$

{προσοχή στα παραπάνω το M_0 είναι η κεντρική επιφανειακή πυκνότητα μάζας.}

6. Βιβλιογραφία

- Battaglia, G, et al. 2006, ‘HI study of the warped spiral galaxy NGC 5055: a disk/dark matter halo offset?’, A&A 447, 49
- Binney, J. & Tremaine, S. “Galactic Dynamics” Princeton University Press, Second Edition (2008)
- Bolatto, A., Wolfire, M. & Leroy, A. 2013 Annual Review of Astronomy and Astrophysics, vol. 51, pp. 207 “The CO-to-H₂ Conversion Factor”
- de Block W., Walter, F., Brinks, E., Trachternach, C., Oh, S.-H., & Kennicutt, R. 2008 The Astronomical Journal, 136, 2648 “High-Resolution Rotation Curves and Galaxy Mass Models from THINGS”
- Jovanovich, M 2017, ‘Two regimes of galaxy dynamics: mass models of NGC 5055 and DDO 154’, MNRAS, 469, 3564
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1996, The Astrophysical Journal, 462, 563 “The Structure of Cold Dark Matter Halos”
- Solomon, P. M., Downes, D., Radford, S. J.E., & Barrett, J. W. 1997 The Astrophysical Journal , 478, 144 “The molecular interstellar medium in ultraluminous infrared galaxies”
- Sofue, Y. 1991 Proceedings of the 146th Symposium of the International Astronomical Union
“Dynamics of Galaxies and Their Molecular Cloud Distributions”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991, p.287, Edited by F. Combes & F. Casoli. “Molecular Gas in the Central Regions of Galaxies”
- van Albada, T. S., Bahcall, J. N., Begeman, K., & Sancisi, R., 1985, The Astrophysical Journal, 295, 305 “Distribution of dark matter in the spiral galaxy NGC 3198”

Τα papers μπορούν να βρεθούν από το site:

http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html <http://arxiv.org/find/astro-ph>

Επίσης, θέματα που αναφέρθηκαν εδώ, καθώς και σχετική βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν και στη διαδικτυακή βάση δεδομένων:

http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Young/Young_contents.html

http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Young/Young6_2.html

<http://ned.ipac.caltech.edu/level5/March01/Battaner/revision.html>