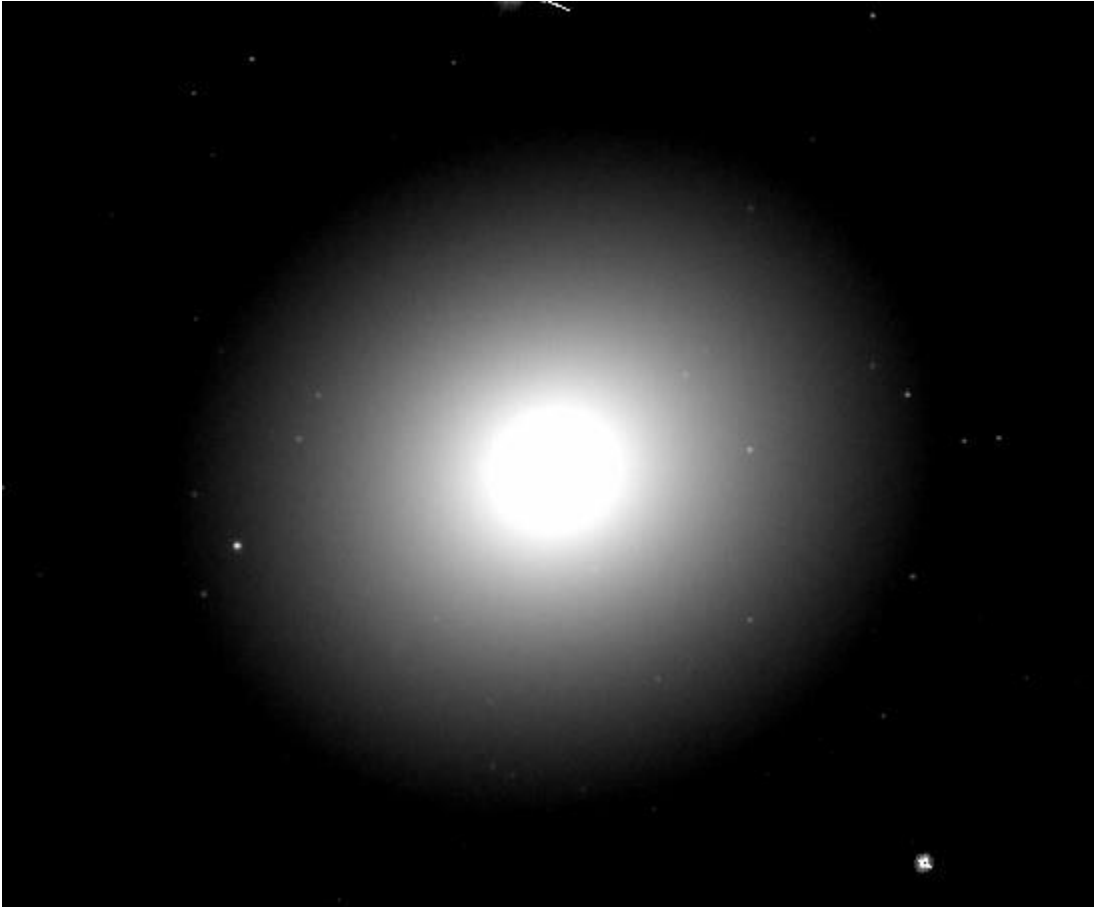


Προπτυχιακή διπλωματική εργασία

Φασματοσκοπία στον γαλαξία NGC1399 με σκοπό
την διεξαγωγή κινηματικών παραμέτρων



Τσαντηράκης Θεόδωρος- AM 4107

Επιβλέπων καθηγητής: Ανδρέας Ζέζας

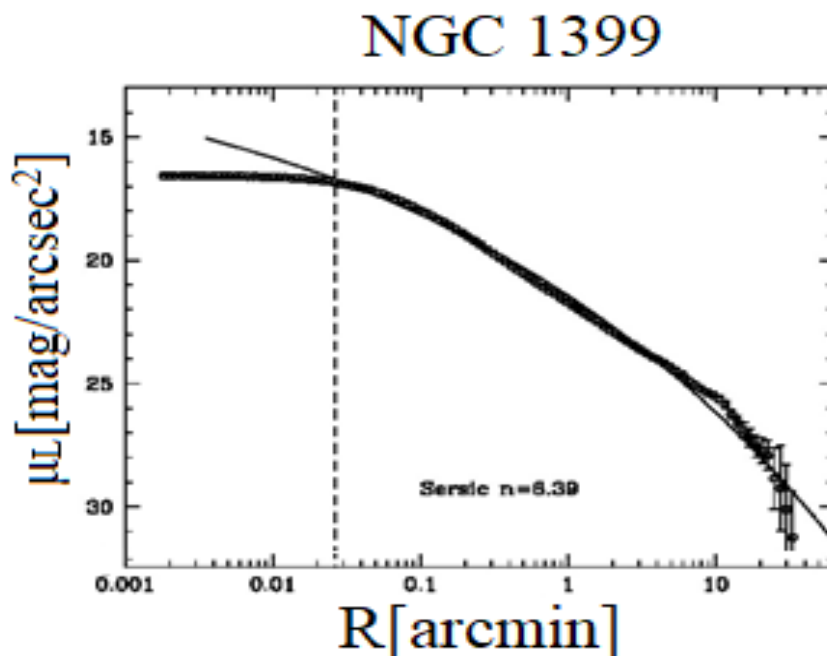
Περίληψη

Η κινηματική μελέτη των αστρικών πληθυσμών σε γαλαξίες έχει αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε μια τέτοια μελέτη για την παρούσα εργασία. Στην διάρκεια της εργασίας αυτής επιχειρήσαμε να μελετήσουμε φάσματα ενός γαλαξία με πυρήνα, του NGC1399 με σκοπό την εύρεση των κινηματικών παραμέτρων των αστρικών πληθυσμών στο κέντρο του. Ξεκινώντας την ανάλυση απο δεδομένα του HST και με την χρήση προγραμμάτων μοντελοποίησης φασμάτων καταλήξαμε στις κινηματικές παραμέτρους του γαλαξία. Η ταχύτητα διασποράς φαίνεται να επαληθεύει τις αναμενόμενες προσδοκίες απο παρόμοιες μελέτες που έχουν διεξαχθεί στο αντικείμενο αυτό.

Εισαγωγή

Απο μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί με την πάροδο των χρόνων, έχουμε αποκτήσει σημαντικές πληροφορίες για την κινηματική συμπεριφορά των αστεριών στο κέντρο των γαλαξιών. Μια κατηγορία που μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα είναι εκείνη των γαλαξιών με “πυρήνα”(core galaxies). Με τον όρο cored galaxy αναφερόμαστε σε μία ειδική κατηγορία γαλαξιών που το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι στο κέντρο τους εμφανίζεται μια έντονη έλλειψη φωτός στο προφίλ επιφανειακής φωτεινότητας τους(surface brightness profile). Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 1 (Marilena Spavone et al,2017) είναι εμφανής η έλλειψη φωτός από το αναμενόμενο προφίλ φωτεινότητας. Η περιοχή που εμφανίζεται έντονα αυτή η απώλεια φωτός ονομάζεται «πυρήνας». Η απώλεια αυτή οφείλεται κυρίως στην έλλειψη αστεριών στην

κεντρική περιοχή του γαλαξία. Σε συνήθεις περιπτώσεις, κατά την διάρκεια ένωσης γαλαξιών με πυρήνα παρατηρείται μια εμφανής μείωση στην πυκνότητα των αστεριών στην περιοχή του πυρήνα και ακολούθως έχουμε και έλλειψη φωτός(light deficiency) σε σχέση με την υπόλοιπη επιφάνεια του τελικού γαλαξία. Αυτό είναι ένα κύριο χαρακτηριστικό των γαλαξιών με πυρήνα και διευκολύνει τον καθορισμό του μεγέθους του πυρήνα τους. Οι cored galaxies ,επίσης, εμπεριέχουν μια μαύρη τρύπα που στις συνήθεις περιπτώσεις είναι πολύ μεγάλη σε μάζα. Η ύπαρξη της υπερμεγέθους μαύρης τρύπας δημιουργεί μια περιοχή εν ονόματι σφαίρα επιρροής στην οποία η βαρυτική δυναμική της μαύρης τρύπας είναι μεγαλύτερη από εκείνη του υπόλοιπου γαλαξία και έτσι επηρεάζει άμεσα τα γύρω άστρα.



Σχήμα 1: Το διάγραμμα αυτό δείχνει το προφίλ επιφανειακής φωτεινότητας του γαλαξία NGC1399 που θα είναι και το βασικό αντικείμενο της μελέτης μας. Η μαύρη γραμμή αποτελεί ένα fit

στο προφίλ επιφανειακής φωτεινότητας και οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν το μέγεθος του πυρήνα. Ο άξονας της ακτίνας είναι σε λογαριθμική κλίμακα και το διάγραμμα είναι παρμένο απο το paper “VEGAS:A VST Early-type GALaxy Survey”.

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε ότι τα άστρα στον πυρήνα ακολουθούν ελλειπτικές τροχιές γύρω απο την μαύρη τρύπα με ταχύτητες που διαφέρουν από άστρο σε άστρο. Έτσι μπορούμε με ανάλυση να δούμε ότι οι ταχύτητες αυτές τείνουν προς μία μέση τιμή χαρακτηριστική για κάθε γαλαξία. Παρ’όλα αυτά αμα παρατηρήσουμε την διασπορά των ταχυτήτων γύρω απο την μέση τιμή αυτή θα δούμε ότι είναι αρκετά υψηλή στο κέντρο του γαλαξία και πέφτει σε χαμηλότερα επίπεδα καθώς απομακρυνόμαστε απο αυτό μέχρις ότου φτάσουμε τα όρια του πυρήνα όπου και συνήθως τείνει σε μία σταθερή τιμή.

Έτσι,σε αυτην την εργασία θα πραγματοποιήσουμε μια κινηματική μελέτη κοντά στο «κέντρο» του γαλαξία. Συγκεκριμένα, θα ασχοληθούμε με τον γαλαξία γνωστό ως NGC1399 που ανήκει στους γαλαξίες με πυρήνα.

Ο NGC1399 είναι ένας ελλειπτικός γαλαξίας στο κέντρο του σμήνους της Καμίνου(Fornax). Απέχει 19.65 Mpc(NED) και έχει RA 3h:38m:29.026s και Declination -35d27m02.36s(NED) . Ο βασικός λόγος που επιλέχθηκε ως αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι το γεγονός ότι είναι αρκετά φωτεινός με μέση επιφανειακή φωτεινότητα 16.34 mag/arcsec. Επιπλέον η ακτίνα του πυρήνα είναι 2.3arcsecs. Αυτό είναι αρκετά μεγάλο για να μπορέσουμε να αναλύσουμε τις κινηματικές παραμέτρους των άστρων στη περιοχή του πυρήνα απο το φάσμα του. Έπειτα απο μια μικρή

έρευνα σε γαλαξίες με αρκετά μεγάλο «πυρήνα» καταλήξαμε στην επιλογή του γαλαξία NGC1399 για την διεκπεραίωση της εργασίας αυτής. Η επιλογή έγινε με βάση την φωτεινότητα ανα arcsec για να εξασφαλίσουμε ότι ο πυρήνας είναι αρκετά λαμπρός για την ανάλυση. Ένα άλλο βασικό κριτήριο ήταν η ακτίνα του πυρήνα που εξασφαλίζει το μέγεθος του πυρήνα να είναι επαρκές καθώς και αν υπήρχαν ήδη αρχεία δεδομένων για τον συγκεκριμένο γαλαξία στις διαδικτυακές βιβλιοθήκες που να είναι στο οπτικό κομμάτι του φάσματος. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η μάζα της μαύρης τρύπας στο κέντρο του γαλαξία υπολογίζεται να είναι $5 \times 10^8 M_{\odot}$ (van der Marel 1999)

Δεδομένα

Τα δεδομένα μας προέρχονται κατα κύριο λόγο από την HLA(Hubble Legacy Archive). Αυτή είναι μια διαδικτυακή βιβλιοθήκη δεδομένων που έχουν ληφθεί από το Hubble Space telescope. Το Hubble Space Telescope (HST) είναι ένα τηλεσκόπιο που λειτουργεί στο διάστημα από το 1990 και λαμβάνει εικόνες αστρονομικών αντικείμενων στο υπεριώδες, ορατό και κοντινό υπέρυθρο σε πολύ μεγάλη απόσταση από την γη.

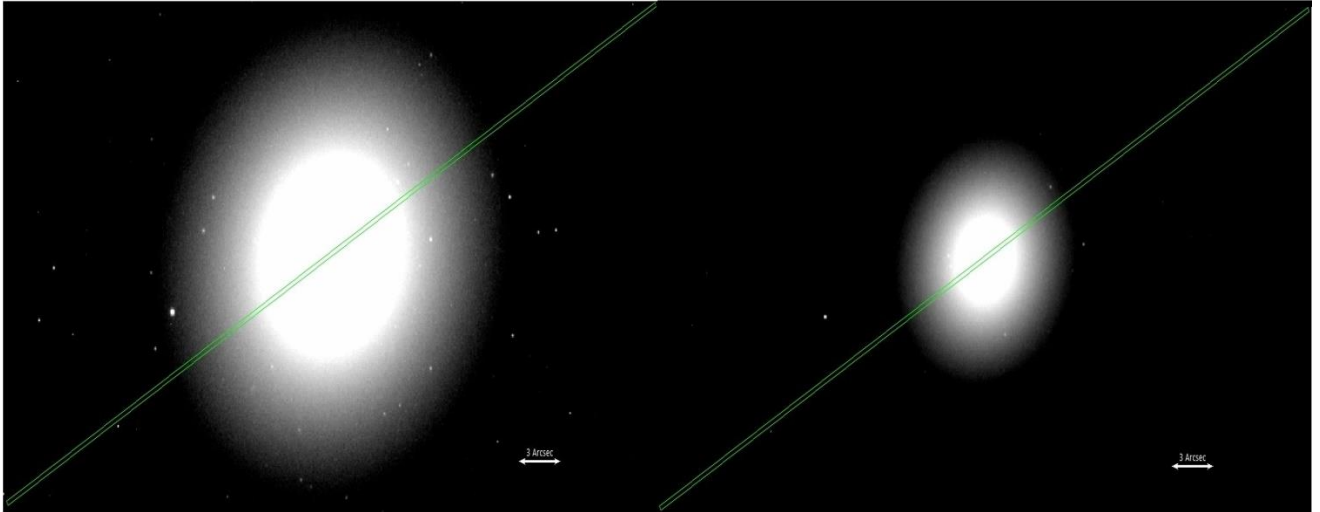
Για να διαλέξουμε ικανοποιητικά φασματικά δεδομένα καταφύγαμε στην επιλογή του ανιχνευτή STIS/CCD του Hubble Space Telescope(HST). Το STIS παρέχει οπτικό πεδίο 52×52 arcseconds και παράλληλα λειτουργεί και ως φασματογράφος μακράς σχισμής που καλύπτει την φασματική περιοχή από τα 1500 έως τα 10300 Angstroms(Å)(STIS/CCD manual). Ο STIS/CCD λειτουργεί κανονικά στη περιοχή του φάσματος 2000-10300Å, δηλαδή στο UV, ορατό και Near-infrared(NIR) και έχει ≈ 0.05 arcsecond square pixels.

Στα δεδομένα μας χρησιμοποιήθηκε το grating G430L του STIS/CCD το οποίο λειτουργεί στη φασματική περιοχή 2900-5700Å με μέση διασπορά 2.7Å ανα pixel και φασματική ανάλυση $\lambda/2\Delta\lambda$ 530-1040.

Χρειάστηκε ,επίσης, να πάρουμε δεδομένα με υψηλούς χρόνους έκθεσης(exposure time) γι'αυτό και αρκεστήκαμε στα δεδομένα που είχαν χρόνους έκθεσης μεγαλύτερους των 1800 secs. Όλες οι παρατηρήσεις έχουν γίνει με το ίδιο slit.Τα δεδομένα που λάβαμε καθώς και βασικές πληροφορίες για αυτά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα(Hubble Legacy archive).

Πίνακας 1:Σύνοψη δεδομένων

Dataset	Detector	Aperture (arcseconds)	Spectral Element	Proposal ID	Exposure time(secs)
O6F420030	STIS/CCD	52x0.2	G430L	9106	2000
O6F420040	STIS/CCD	52x0.2	G430L	9106	2861
O6F420050	STIS/CCD	52x0.2	G430L	9106	2861
O6F420060	STIS/CCD	52x0.2	G430L	9106	2861
O6F421030	STIS/CCD	52x0.2	G430L	9106	2000
O6F421040	STIS/CCD	52x0.2	G430L	9106	2861
O6F421060	STIS/CCD	52x0.2	G430L	9106	2858



Εικόνα 1: Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ο γαλαξίας NGC1399 μέσα από το όργανο ACS του HST στο φίλτρο F475W με εύρος φάσματος 4031-5489 Å. Αριστερά φαίνεται ο γαλαξίας με το long slit διαστάσεων 52x0.2 arcseconds που χρησιμοποιήθηκε στην λήψη των δεδομένων. Δεξιά το φωτεινότερο κομμάτι της εικόνας απεικονίζει τον εκτιμώμενο σε διαστάσεις πυρήνα του γαλαξία μαζί με το long slit των παρατηρήσεων

Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται μία εικόνα του Γαλαξία NGC1399 όπως φαίνεται από εικόνα του HST με το long slit 52x0.2 arcseconds με το οποίο έχουν παρθεί οι παρατηρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία. Η εικόνα προέρχεται από το όργανο ACS του HST και έχει ληφθεί χρησιμοποιώντας την κάμερα WFC με το φίλτρο F475W που έχει μέσο μήκος κύματος 4760 Å και εύρος 1458 Å (ACS Manual) και επομένως λειτουργεί στην περιοχή 4031-5489 Å του οπτικού. Στην αριστερή εικόνα φαίνεται ο γαλαξίας μαζί με το slit σύμφωνα με το οποίο έχουν γίνει οι παρατηρήσεις. Στην δεξιά εικόνα φαίνεται ο πυρήνας του γαλαξία NGC1399 (2.3 arcseconds radius) μαζί με το long slit των παρατηρήσεων μας.

Ανάλυση δεδομένων

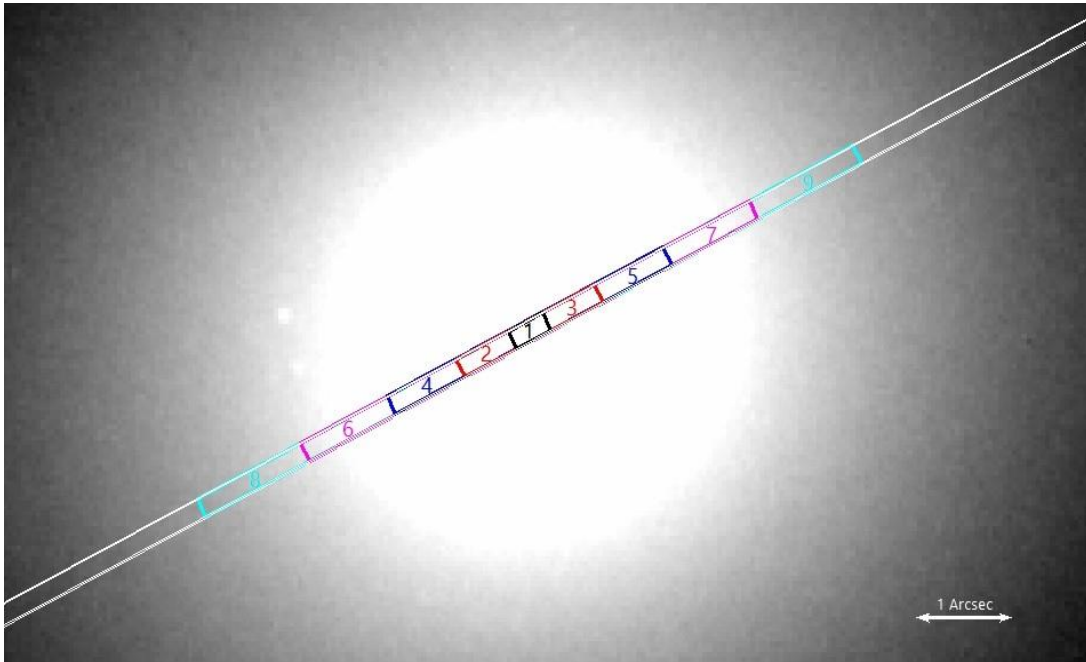
Ο στόχος της ανάλυσης μας είναι να μετρήσουμε την διασπορά ταχυτήτων στα φάσματα των αστρικών πληθυσμών συναρτήση της απόστασης απο τον πυρήνα του γαλαξία. Τα φάσματα εξήχθησαν απο διαφορετικές περιοχές κατα μήκος του slit όπως φαίνεται στην εικόνα 2. Η κεντρική περιοχή με μήκος 4 pixels(0.406 arcseconds) ορίστηκε στον πυρήνα του γαλαξία. Όμως, καθώς η απόσταση απο το κέντρο μεγαλώνει ,τόσο η ένταση μειώνεται το οποίο θέλουμε να αποφύγουμε. Γι' αυτόν τον λόγο τα apertures που απέχουν περισσότερο απο το κέντρο του γαλαξία είναι μεγαλύτερα για να αντισταθμίσουν την απώλεια έντασης. Η θέση και το μέγεθος των apertures που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση των φασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση μας φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2:μεγέθη και θέση των apertures

Αριθμός aperture	Μήκος(pixels)	Θέση(pixels)
1	4	0
2	6	-5
3	6	+5
4	8	-12
5	8	+12
6	10	-21
7	10	+21
8	12	-32
9	12	+32

Σύμβαση: Το πλην(-) στον παραπάνω πίνακα υποδεικνύει ότι βρισκόμαστε αριστερά του κέντρου του γαλαξία που τέθηκε ως μηδεν ενώ το συν(+) ότι βρισκόμαστε δεξιά του σημείου μηδέν.Στον παραπάνω πίνακα η θέση αναφέρεται στο κέντρο του

κάθε aperture και το μήκος του εκτείνεται εξ ημισίας προς κάθε κατεύθυνση.



Εικόνα 2: Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ο πυρήνας του γαλαξία NGC1399 μαζί με τα apertures που χρησιμοποιήθηκαν

Στην εικόνα 2 φαίνεται ο γαλαξίας NGC1399 με τον εκτιμώμενο «πυρήνα» και τα apertures που χρησιμοποιήθηκαν. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα apertures 8 και 9 είναι έξω από τον εκτιμώμενο πυρήνα.

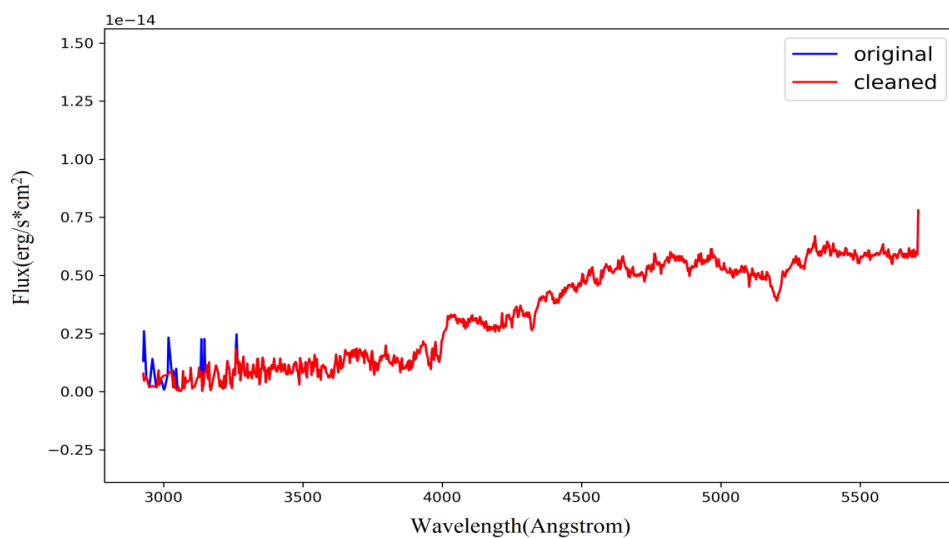
Το επόμενο βήμα είναι να θέσουμε στο πρόγραμμα το υπόβαθρο(background) ώστε να μπορεί να υπολογίσει τον θόρυβο υποβάθρου και να τον αφαιρέσει.

Τέλος, για την εξαγωγή του φάσματος χρειάζεται να καθορίσουμε την περιοχή του aperture στο δισδιαστατο φάσμα. Αυτό γίνεται μέσω του ίχνους(trace) του φάσματος μιας σημειακής πηγής. Το tracing έγινε μόνο στο κεντρικό aperture και τα άλλα apertures ακολουθούν το tracing του κεντρικού.

Scombine

Προκειμένου να μεγιστοποιήσουμε την ποιότητα των φασμάτων, συνδυάσαμε δεδομένα από τα επιμέρους αρχεία παρατηρήσεων που παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Η εξαγωγή των φασμάτων έγινε ανεξάρτητα για την κάθε παρατήρηση. Στην συνέχεια τα επιμέρους φάσματα για κάθε μια θέση (Πίνακας 2), συνδυάστηκαν μέσω της εντολής `scombine` της IRAF. Σε κάθε pixel συγκρίνονται οι τιμές έντασης των αρχείων εισόδου και επιλέγεται η median τιμή (δηλαδή η ενδιάμεση τιμή). Ο συνδυασμός γίνεται `aperture by aperture`, δηλαδή συνδυάζει το κάθε `aperture` με το αντίστοιχο του από τις υπόλοιπες παρατηρήσεις.

Στην συνέχεια μέσω ενός script γίνεται περαιτέρω καθαρισμός στα δεδομένα. Αρχικά, αφαιρούνται οι ακραίες τιμές που ενδέχεται να έχουν παραμείνει από το `scombine` και ανήκουν σε κοσμικές ακτίνες. Ο καθαρισμός που πραγματοποιήθηκε είναι μια μορφή `sigma-clipping`. Αρχικά υπολογίσαμε το `root mean square (rms)` και αφαιρέσαμε τις ακραίες τιμές που ήταν μεγαλύτερες από ένα πολλαπλάσιο του `rms`.



Σχήμα 2: Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται το φάσμα που προέρχεται από τα αρχικά δεδομένα με μπλέ χρώμα και το φάσμα που έχει υποστεί καθαρισμό με κόκκινο χρώμα. Το φάσμα αντιστοιχεί στο κεντρική θέση.

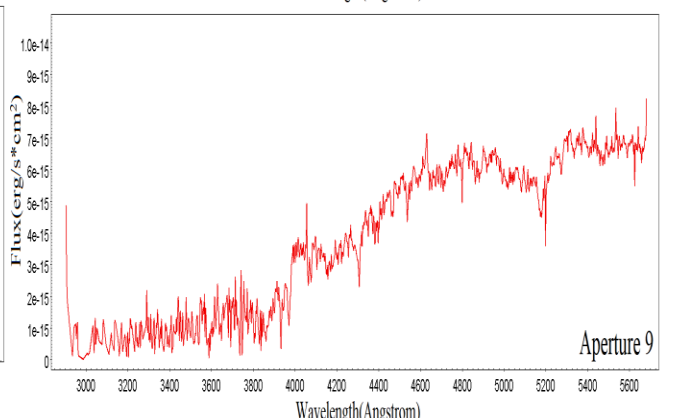
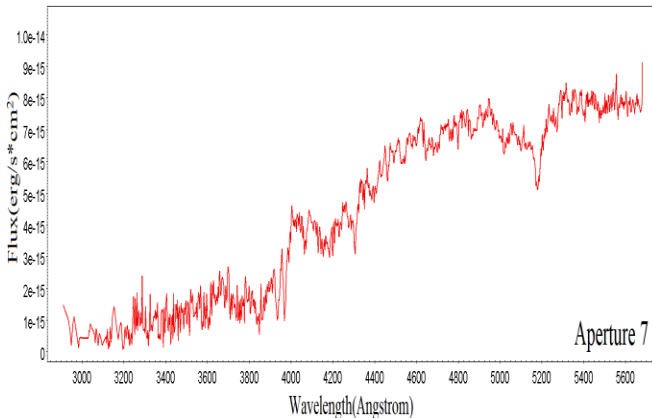
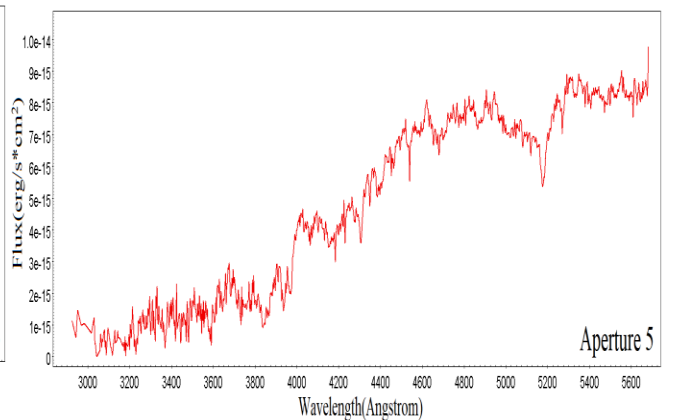
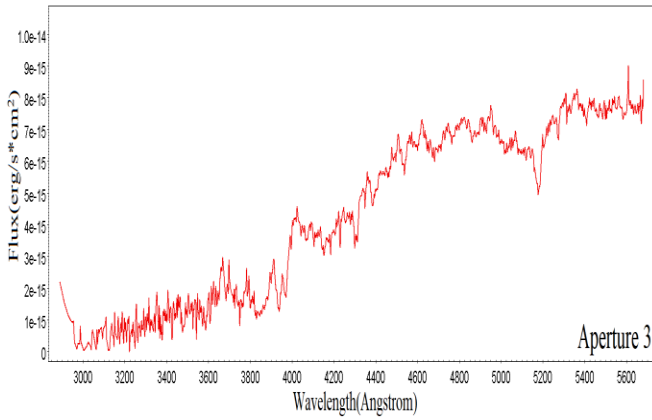
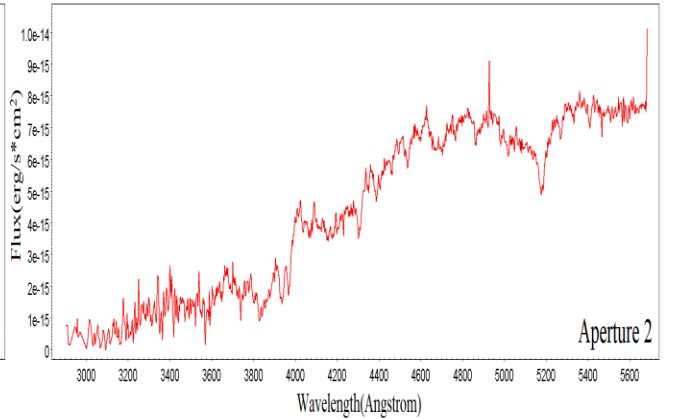
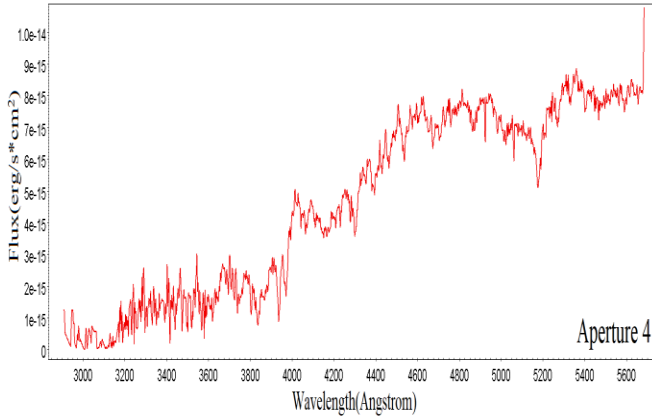
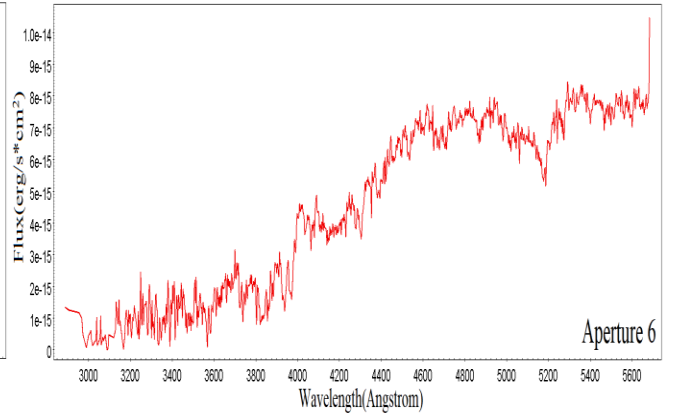
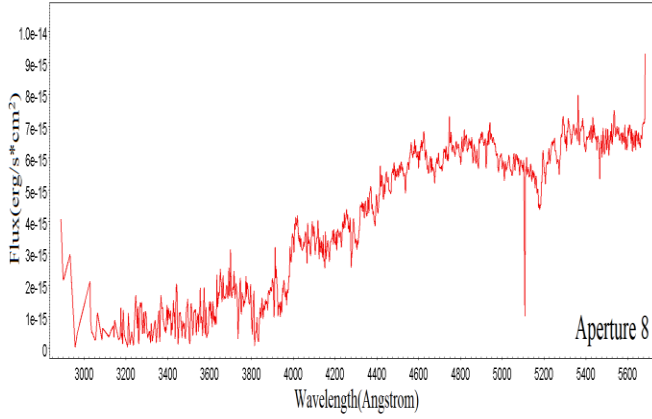
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται το αρχικό φάσμα που προέρχεται από τα δεδομένα με μπλέ χρώμα και το καθαρισμένο από ακραίες τιμές φάσμα με κόκκινο. Το φάσμα ανήκει στο κεντρική θέση και είναι ενδεικτικό για τα υπόλοιπα.

Στην συνέχεια γίνεται διόρθωση στο μήκος κύματος λόγω ερυθρότητας έτσι ώστε να έχουμε το μήκος κύματος που εκπέμπεται από τον γαλαξία και όχι αυτό που μετράμε εμείς. Η διόρθωση αυτή γίνεται μέσω του νόμου ερυθρότητας.

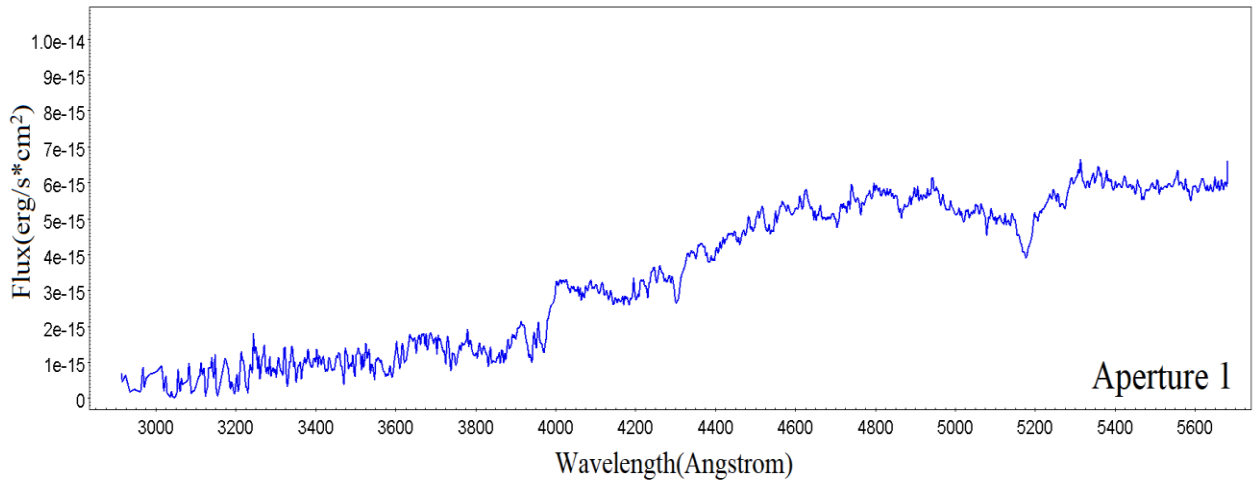
$$z = \frac{(\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{em}})}{\lambda_{\text{em}}} \leftrightarrow \lambda_{\text{em}} = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{z + 1}$$

Όπου z είναι η ερυθρότητα (redshift), λ_{obs} είναι το μήκος κύματος που μετρήθηκε από το όργανο μας και λ_{em} είναι το μήκος κύματος που εκπέμπεται από το γαλαξία.

Τέλος, μέσω κώδικα παρεμβάλλονται (interpolation) μήκη κύματος που μπορεί να περιέχει το αρχείο δεδομένων έτσι ώστε να έχουμε μετρήσεις της έντασης ανά $\Delta\lambda = 1 \text{ \AA}$.



Σχήμα 3: Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνονται τα φάσματα που έχουν προκύψει μέχρι αυτό το στάδιο της μελέτης για κάθε aperture ξεχωριστά εκτός του κεντρικού. Οι άξονες είναι ένταση σε $\text{erg/s}\cdot\text{cm}^2$ και μήκος κύματος σε Angstrom.



Σχήμα 4: Σε αυτό το σχήμα φαίνεται το φάσμα που προέκυψε από την ανάλυση μας και ανήκει στην κεντρική θέση. Οι άξονες είναι ένταση σε $\text{erg/s}\cdot\text{cm}^2$ και μήκος κύματος σε Angstrom.

Τα παραπάνω διαγράμματα ανήκουν στα φάσματα που προέκυψαν από τα δεδομένα μας. Στο σχήμα 3 φαίνονται τα φάσματα των apertures με σειρά από αριστερά προς δεξιά στο long slit εκτός του κεντρικού (aperture #1) το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 4. Τα διαγράμματα αυτά απεικονίζουν τα τελικά φάσματα που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση μας.

Starlight Project

Αφού έχουν πραγματοποιηθεί όλες οι παραπάνω διαδικασίες, τα φάσματα έχουν φτάσει πλέον στο σημείο όπου είναι έτοιμα για την συνέλιξη με τα πρότυπα φάσματα γαλαξιών (convolution with templates). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσα από ένα αυτοτελές λογισμικό επεξεργασίας αστρονομικών δεδομένων, το Starlight (The SEAGal/STARLIGHT Project). Το λογισμικό αυτό μοντελοποιεί το φάσμα ως γενικό συνδυασμό φασμάτων διαφορετικών αστρικών πληθυσμών. Στην διαδικασία αυτή, προκειμένου να γίνει σωστά η προσαρμογή των μοντέλων με το παρατηρούμενο φάσμα, πρέπει πρώτα το μοντέλο να τροποποιηθεί ώστε να έχει την ίδια ανάλυση με το παρατηρούμενο φάσμα. Αυτό γίνεται μέσω της συνέλιξης του με μια κανονική κατανομή με μέση τιμή v_0 και τυπική απόκλιση σ . Η τυπική απόκλιση εμπεριέχει την ανάλυση του φασματογράφου σ_0 και την διασπορά ταχυτήτων των αστρικών πληθυσμών ($\sigma^2 = \sigma_0^2 + v_d^2$). Η ανάλυση του φασματογράφου είναι ≈ 500 . Επομένως από την τιμή της τυπικής απόκλισης μπορούμε να υπολογίσουμε την διασπορά ταχυτήτων v_d .

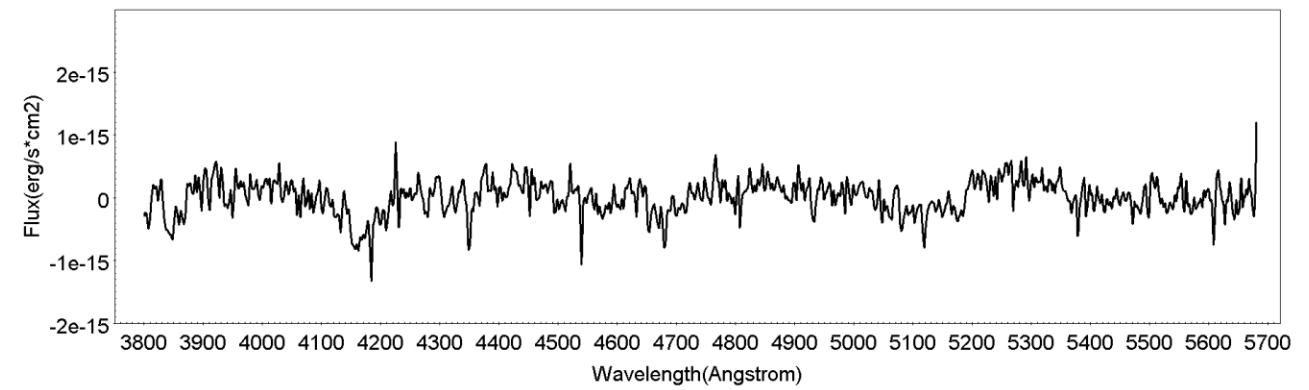
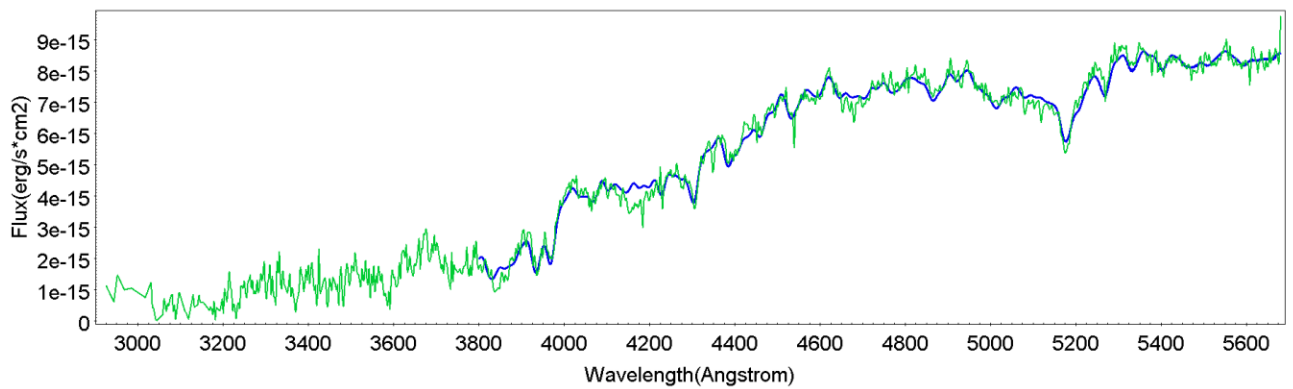
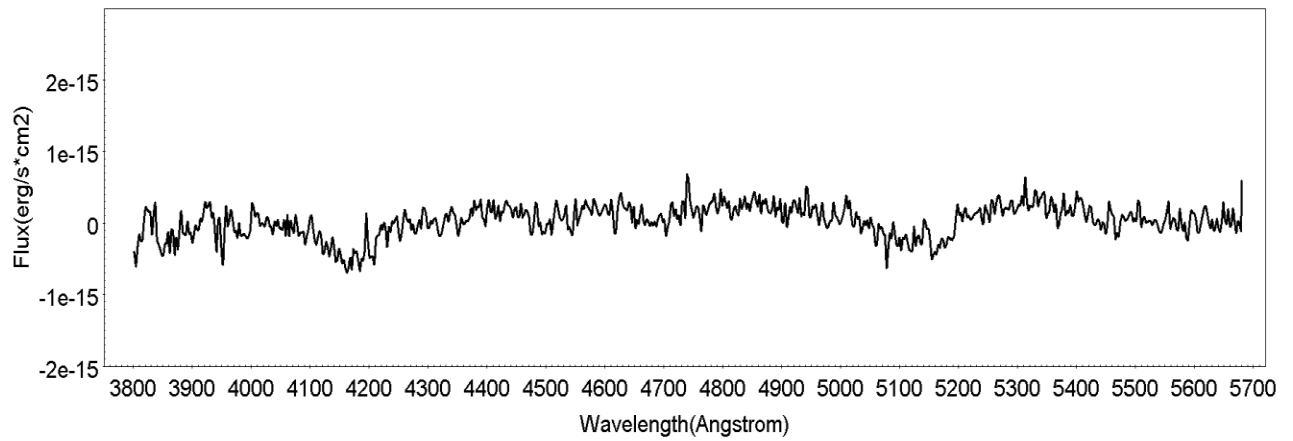
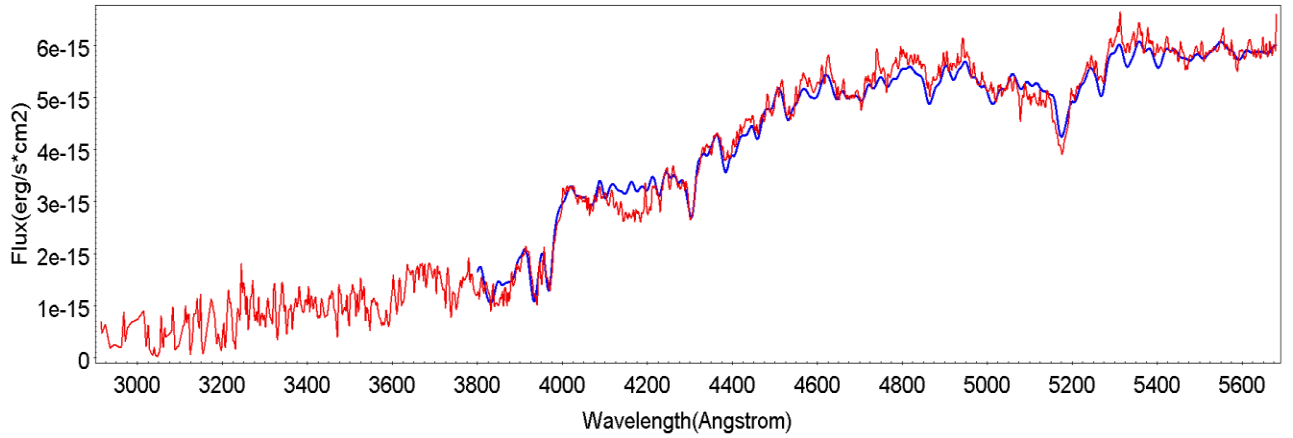
Με λίγα λόγια, το Starlight διαβάζει από μια βιβλιοθήκη αστρικών φασμάτων (μοντέλα BC03). Από το αρχείο βάσεων διαβάζονται τα φάσματα αστρικών πληθυσμών διαφορετικών ηλικιών που ανήκουν στα μοντέλα BC03 καθώς και παράμετροι όπως η ηλικία του κάθε γαλαξία, η μεταλλικότητα του και η μεσοαστρική απορρόφηση.

Στην ανάλυση αγνοήθηκαν περιοχές του φάσματος που περιέχουν ισχυρές γραμμές εκπομπής (ιδιαίτερα στον πυρήνα) ή έχουν χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο.

Πρέπει επίσης να δοθούν αρχικές υποθέσεις για τις κινηματικές παραμέτρους έτσι ώστε το πρόγραμμα να αρχίσει απο μια υπόθεση και να αρχίσει να προσεγγίζει την τελική τιμή, καθώς και το reddening law (νόμος απορρόφησης). Στην ανάλυση μας χρησιμοποιήσαμε τον νόμο απορρόφησης των Cardelli, Clayton and Mathis (CCM).

Κατα την συνέλιξη το πρόγραμμα δίνει μεγαλύτερη σημασία στις γραμμές απορρόφησης του φάσματος και παράγει στατιστικές παραμέτρους προκειμένου να δημιουργήσει διάφορα μοντέλα. Η ελαχιστοποίηση αυτών το παραμέτρων παράγει το βέλτιστο μοντέλο.

Έτσι, το Starlight μας παρέχει ένα αρχείο εξόδου που περιέχει όλες τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του, όλες τις στατιστικές ποσότητες που υπολογίστηκαν κατά την λειτουργία αυτή καθώς και ποσότητες που θα εστιάσουμε περισσότερο για την συγκεκριμένη μελέτη. Απο το αρχείο αυτό πέρνουμε τα v_{dmin} και v_{0min} που αντιστοιχούν στην διασπορά ταχυτήτων που ελαχιστοποιεί τις στατιστικές παραμέτρους και ανήκει στο βέλτιστο μοντέλο καθώς και το velocity offset του βέλτιστου μοντέλου.



Σχήμα 5: Το παραπάνω σχήμα χωρίζεται σε 4 διαγράμματα. Στο διάγραμμα 1 φαίνεται το φάσμα που προέκυψε από την ανάλυση μας για την κεντρική θέση με κόκκινο χρώμα και το μοντέλο που προκύπτει από το πρόγραμμα starlight μετά την λειτουργία του με μπλέ χρώμα. Στο διάγραμμα 2 εμφανίζονται τα υπολείμματα που προκύπτουν από την αφαίρεση του μοντέλου του starlight από το φάσμα της ανάλυσης μας για την κεντρική θέση. Στο διάγραμμα 3 απεικονίζεται το φάσμα που προέκυψε από την ανάλυση μας για την 5^η θέση με πράσινο χρώμα και το μοντέλο που προκύπτει από το πρόγραμμα Starlight μετά την λειτουργία του με μπλέ χρώμα. Στο διάγραμμα 4 εμφανίζονται τα υπολείμματα που προκύπτουν από την αφαίρεση του μοντέλου του Starlight από το φάσμα της ανάλυσης μας για την 5^η θέση.

Στο σχήμα 5 απεικονίζονται τέσσερα διαγράμματα εκ των οποίων το 1^ο είναι το φάσμα της ανάλυσης μας για την κεντρική θέση με κόκκινο χρώμα και το μοντέλο του starlight για την ίδια θέση με μπλέ χρώμα. Ομοίως στο 3^ο διάγραμμα απεικονίζεται το φάσμα της ανάλυσης μας για την 5^η θέση με πράσινο χρώμα και το μοντέλο του starlight για την 5^η θέση με μπλέ χρώμα. Στο 2^ο διάγραμμα απεικονίζονται τα υπολείμματα που προκύπτουν αν αφαιρέσουμε το μοντέλο του Starlight για την κεντρική θέση από το φάσμα της ανάλυσης για την κεντρική θέση. Ομοίως, στο 4^ο διάγραμμα απεικονίζονται τα υπολείμματα που προκύπτουν αν αφαιρέσουμε το μοντέλο του Starlight για την 5^η θέση από το φάσμα της ανάλυσης για την 5^η θέση. Το σχήμα αυτό μπορεί να μας δείξει πόσο καλό είναι το μοντέλο που προκύπτει από το πρόγραμμα Starlight για τις δύο αυτές θέσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα Starlight το ρυθμίσαμε να λειτουργήσει στην

περιοχή 3800-5680 Angstrom του φάσματος ώστε να αποφύγουμε τον θόρυβο που είναι αισθητός στην περιοχή μικρότερη των 3800 Angstrom.

Το Starlight χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία συνολικά 10 διαφορετικών μοντέλων αλλάζοντας κάποιες εισαγωγικές παραμέτρους κάθε φορά με σκοπό να υπολογιστεί μια μέση τιμή για κάθε θέση στην ταχύτητα διασποράς καθώς και η τυπική απόκλιση της.

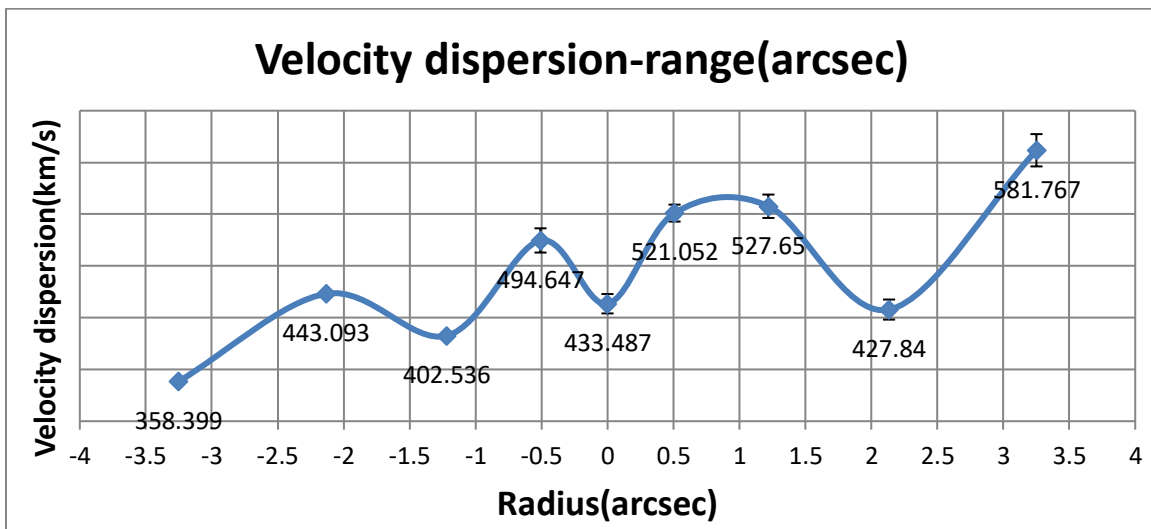
Αποτελέσματα

Έχοντας κάνει όλη την παραπάνω διαδικασία έχουμε πλέον φτάσει στο σημείο που έχουμε υπολογίσει τις κινηματικές παραμέτρους για κάθε aperture και θέλουμε να δούμε πως συμπεριφέρεται η διασπορά ταχυτήτων συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του γαλαξία. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μέσες τιμές της και η αντίστοιχη απόσταση από το κέντρο του γαλαξία όπως υπολογίστηκε με βάση τα pixel που αντιπροσωπεύει το κάθε aperture. Το angular scale του grating που χρησιμοποιήθηκε είναι $2.8224 \cdot 10^{-5}$ deg/pixel. Έτσι κάνοντας τον υπολογισμό για να το μετατρέψουμε σε arcseconds ($2.8224 \cdot 10^{-5} \cdot 3600 = 0.101608$ arcseconds/pixel) θα υπολογίσουμε την απόσταση που απέχει το κάθε aperture από το κεντρικό pixel.

Πίνακας 3: Διασπορά ταχυτήτων συναρτήσει απόστασης (σε arcsec)

Aperture	Διασπορά ταχυτήτων v_d (km/s)	Τυπική απόκλιση σ (km/s)	Απόσταση απο το κέντρο(arcsec)
1	433,487	9.352	0
2	494,647	11.716	- 0.508
3	521,052	8.172	+0.508
4	402,536	0.750	-1.219
5	527,650	11.313	+1.219
6	443,093	1.733	-2.134
7	427,840	9.691	+2.134
8	358,399	1.420	-3.251
9	581.767	15.620	+3.251

Με τα δεδομένα του πίνακα 3 παίρνουμε το παρακάτω διάγραμμα:



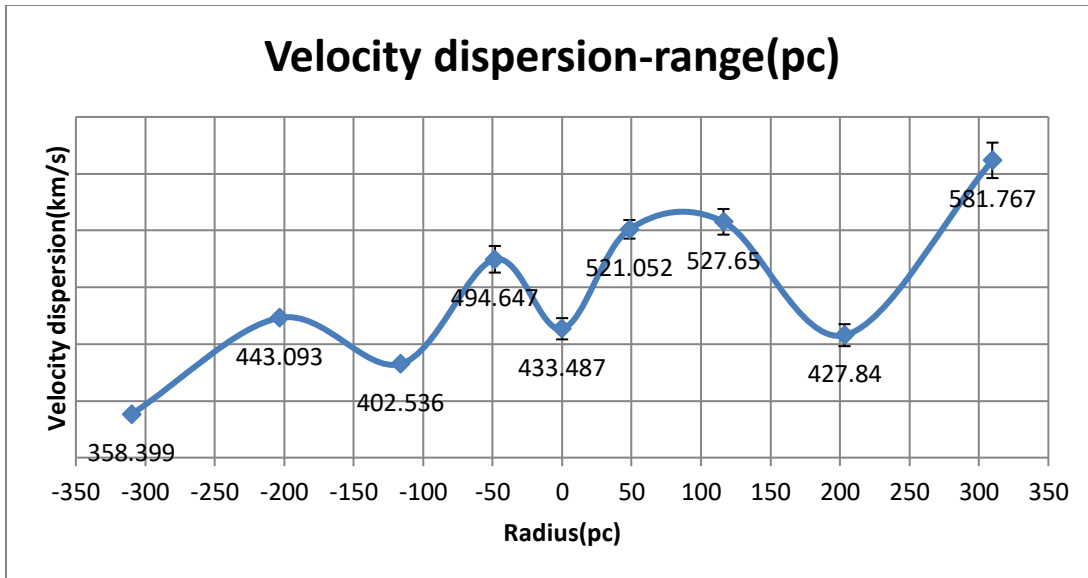
Σχήμα 6: Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η ταχύτητα διασποράς σε συνάρτηση με την απόσταση σε μονάδες γωνίας arcsecs. Τα error bars αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση της ταχύτητας διασποράς.

Τέλος, γνωρίζοντας την απόσταση του γαλαξία NGC1399(19.65 Mpc) θα κάνουμε μια μετατροπή των μονάδων arcsec σε pc για να δούμε την συμπεριφορά της ταχύτητας διασποράς συναρτήσει απόστασης.

Πίνακας 4:Διασπορά ταχυτήτων συναρτήσει απόστασης(σε pc)

Aperture	Διασπορά ταχυτήτων $v_d(\text{km/s})$	Τυπική απόκλιση $\sigma(\text{km/s})$	Απόσταση απο το κέντρο(pc)
1	433,487	9.352	0
2	494,647	11.716	- 48,399
3	521,052	8.172	+48,399
4	402,536	0.750	-116,157
5	527,650	11.313	+116,157
6	443,093	1.733	-203,275
7	427,840	9.691	+203,275
8	358,399	1.420	-309,753
9	581.767	15.620	+309,753

Η μετατροπή μας δίνει τον πίνακα 4 και έγινε μετατρέποντας την γωνία ενός arcsec(θ) σε pc μέσω του $\tan(\theta)=s/D$ όπου s η ζητούμενη απόσταση, $D=19.65$ Mpc η απόσταση του γαλαξία και θ η γωνία 1 arcsec. Έτσι παίρνουμε ότι 1 arcsec=95.27 pc και ακολούθως μπορούμε να δούμε ότι 1 pixel=9.68 pc το οποίο φαίνεται λογικό αφού 1 arcsec \approx 10 pixels(1 pixel=0.101608 arcsecs). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πυρήνας του γαλαξία(2.3 arcsecs) υπολογίζεται στα 219.121 pc.



Σχήμα 7: Σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται η ταχύτητα διασποράς συναρτήση της απόστασης απο το κέντρο σε μονάδες pc. Τα error bars αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση της ταχύτητας διασποράς

Έτσι παίρνουμε το παραπάνω διάγραμμα διασποράς ταχυτήτων-απόστασης. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι ακολουθεί πλήρως το θεωρητικό μοντέλο όσο βρισκόμαστε εντός του πυρήνα καθώς είναι εμφανής η αρχική αύξηση της ταχύτητας διασποράς έως ότου φτάσει σε ένα τοπικό μέγιστο και στην συνέχεια ισορροπεί σε μία «περίπου» σταθερή τιμή. Άξιζει να σημειωθεί ότι το τελευταίο σημείο είναι εκτός του πυρήνα και φαίνεται να ανεβαίνει η ταχύτητα διασποράς πηγαίνοντας δεξιά ενώ μειώνεται πηγαίνοντας αριστερά.

*Το S/N είναι ένας δείκτης που δείχνει το ποσοστό ανάμεσα στο σήμα (signal) που καταγράφει ένας μετρητής(πχ CCD), και τον θόρυβο(noise) που μπορεί να οφείλεται σε πολλούς λόγους ανάλογα την περίπτωση.Το S/N συνήθως βοηθάει στο να

κανονικοποιήσουμε το φάσμα μας ώστε να έχουμε μόνο ωφέλιμα δεδομένα και όχι δεδομένα με θόρυβο.

Συμπεράσματα

Για να συνοψίσουμε, στην διάρκεια της εργασίας πραγματοποιήθηκε έρευνα με σκοπό λήψη των κινηματικών παραμέτρων μέσα από φάσματα που ελήφθησαν από το Hubble space telescope. Τα φάσματα αφορούσαν των γαλαξία NGC1399 στο κέντρο του σμήνους της Καμίνου(Fornax) ο οποίος έχει RA 3h:38m:29s και Declination -35:27Deg. Έπειτα από καθαρισμό και επεξεργασία των φασμάτων, χρησιμοποιήθηκε ένα πρόγραμμα που αντλεί τις κινηματικές παραμέτρους μέσα από ένα μοντέλο που δημιουργείται από την συνέλιξη ενός πρότυπου(template) φάσματος και του φάσματος των δεδομένων μας.

Τα αποτελέσματα μας παράγουν ικανοποιητικές τιμές ταχύτητας διασποράς και φαίνονται να επαληθεύουν το θεωρητικό μοντέλο της ταχύτητας διασποράς καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο του γαλαξία. Οι τιμές της ταχύτητας διασποράς είναι κάπως μεγαλύτερες από το αναμενόμενο αποτέλεσμα 388 ± 54 km/s σύμφωνα με τους Grillmair et al(The Velocity Dispersion of Globular Clusters in NGC 1399) του 1994. Παρ'όλα αυτά στο τελικό διάγραμμα μας φαίνεται το μέγιστο της ταχύτητας διασποράς στον «πυρήνα» του NGC1399 καθώς και η άνοδος της ταχύτητας διασποράς εκτός του πυρήνα που δικαιολογείται από την συνεχή αύξηση μάζας(άστρα,σκόνη,σκοτεινή μάζα) που εμπεριέχεται.

Βιβλιογραφία

An introduction to modern astrophysics by Bradley Carroll and Dale Ostlie

Galactic Astronomy by James Binney and Michael Merrifield

Εισαγωγή στην σύγχρονη αστροφυσική του Χαράλαμπου Βαρβόγλη

NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) για πληροφορίες σχετικές με τον γαλαξία NGC1399

<https://hla.stsci.edu/> Hubble legacy archive που ήταν το site απο το οποίο αντλήθηκαν τα αρχεία δεδομένων παρατήρησης.

<https://hst-docs.stsci.edu/acsihb> το ACS manual για πληροφορίες σχετικά με το όργανο ACS που χρησιμοποιήθηκε για τις εικόνες

<https://hst-docs.stsci.edu/stisihb> το STIS/CCD manual για πληροφορίες σχετικά με το όργανο STIS/CCD που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των παρατηρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία

The SEAGal/STARLIGHT Project software by UFSC

<http://starlight.ufsc.br> που ήταν το βασικό πρόγραμμα μοντελοποίησης του φάσματος προκειμένου να καταλήξουμε στις κινηματικές παραμέτρους

Van der Marel, R. 1999, in ASP Conf. Ser. 182, Galaxy Dynamics, ed. D. Merritt, M. Valluri, & J. A. Sellwood (San Francisco : ASP)

Cardelli Jason A., Clayton Geoffrey C., Mathis John S. 1989ApJ..345..245C “The Relationship between Infrared, Optical and Ultraviolet Extinction”

Grillmair Carl J., Freeman K. C., Bicknell G. V. et al.
1994ApJ...422L...9G “The Velocity Dispersion of Globular
Clusters in NGC 1399”

Spavone Marilena, Capaccioli Massimo, Napolitano Nicola R. et al.
2017A&A...603A..38S “VEGAS: A VST Early-type Galaxy
Survey. II. Photometric study of giant ellipticals and their stellar
halos”

Αναγνωρίσεις

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ανδρέα Ζέζα για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το κομμάτι της έρευνας σε πρώτο βαθμό και για τις εμπειρίες που ακολούθησαν μέσα από τις προσπάθειες μου αυτές. Χωρίς την δική του συγκατάθεση και καθοδήγηση δεν θα είχα καταφέρει τα παραπάνω αποτελέσματα.

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας το οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω που χωρίς αυτόν δεν θα κατάφερα να διεκπεραιώσω την παραπάνω εργασία είναι ο Paolo Bonfini. Υπήρξε πολύ σημαντικός συνεργάτης και καθοδηγητής στην διεκπαιρέωση της εργασίας αυτής καθώς με βοήθησε όχι μόνο στην δημιουργία κατάλληλου περιβάλλοντος για την διεκπαιρέωση της εργασίας αλλά και με δίδαξε την γλώσσα προγραμματισμού σε πιο προχωρημένο επίπεδο από ότι γνώριζα.