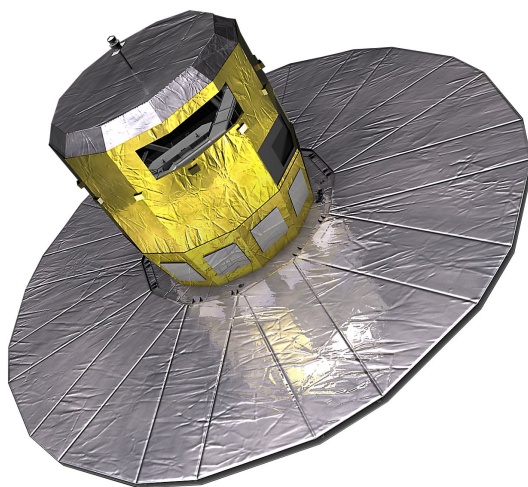


ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ, ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΓΑΛΑΞΙΩΝ
ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ
ΑΠΟΣΤΟΛΗ GAIΑ.



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΚΑΡΑΜΠΕΛΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2012

στη Βίκυ

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου την κ. Μαίρη Κοντιζά, Επίκουρη Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Αθηνών και κύρια επιβλέπουσα της διδακτορικής διατριβής, και τον κ. Βαγγέλη Κοντιζά, Επίτιμο Διευθυντή Ερευνών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, για όσα έμαθα και μαθαίνω ακόμα κοντά τους, για τη στήριξή τους, για την άριστη ερευνητική μας συνεργασία και για τη χαρά να είμαι ένας από τους αποδέκτες της αγάπης τους για τους νέους ανθρώπους.

Με το ίδιο πνεύμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αναστάσιο Δαπέργολα, Διευθυντή Ερευνών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, και τον κ. Ιωάννη Μπέλλα-Βελίδη, Κύριο Ερευνητή του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, για την πολύτιμη συνεργασία τους.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά το μέλος της τριμελούς επιτροπής παρακολούθησης της διδακτορικής διατριβής κ. Π. Νιάρχο, Καθηγητή του Πανεπιστημίου Αθηνών, και τα μέλη της επταμελούς επιτροπής εξέτασης της διδακτορικής διατριβής κ. Κ. Τσίγκανο και κ. Ξ. Μουσά, Καθηγητές του Πανεπιστημίου Αθηνών, και κ. Δ. Χατζηδημητρίου και κ. Α. Μαστιχιάδη, Αναπληρωτές Καθηγητές του Πανεπιστημίου Αθηνών, για την άριστη συνεργασία και τις εύστοχες παρατηρήσεις τους. Τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου θα ήθελα να εκφράσω στην κ. B. Rocca-Volmerange, Καθηγήτρια του Institut d'Astrophysique de Paris (IAP) και του Université de Paris-Sud XI, IAS, για την πολύτιμη συνεργασία και καθοδήγησή της, καθώς και το IAP για τη φιλοξενία κατά τις επισκέψεις μου το 2008 και το 2009.

Θα ήθελα τέλος να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξή της και τους Ευδοκία Λιβανού, Πέτρο Δραζίνο, Γιώργο Βασιλόπουλο, Σάσα Τσάτση, Νάνσυ Σαλάμεχ, Maya Belcheva, Grigor Nikolov και Βιβή Τσαλμαντζά για τη συνεργασία τους.

Μέρος της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής χρηματοδοτήθηκε από τα ερευνητικά προγράμματα «Καποδίστριας» του Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων Έρευνας (70/4/5799 και 70/4/11112) και το ερευνητικό πρόγραμμα "ESA PRODEX" του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (70/3/11556).

Περίληψη

Ο δορυφόρος Gaia θα εκτοξευτεί το 2013 και θα παρατηρήσει τον ουρανό επί πέντε έτη. Στο τέλος της αποστολής του θα έχει προσφέρει στην επιστημονική κοινότητα μία τεράστια βάση δεδομένων αστρομετρίας, φωτομετρίας και φασματοσκοπίας ενός δισεκατομμυρίου αστερών του Γαλαξία μας και γειτονικών γαλαξιών του Τοπικού Σμήνους, γαλαξιών, κβάρζαρς, εξωπλανητών, υπερκαινοφανών και αντικειμένων του Ηλιακού μας Συστήματος. Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της προετοιμασίας της Ευρωπαϊκής διαστημικής αποστολής Gaia και πιο συγκεκριμένα για τις ανάγκες του συστήματος Unresolved Galaxy Classifier (UGC), το οποίο πρόκειται να ταξινομήσει και να παραμετροποιήσει τα εκατομμύρια των φασμάτων γαλαξιών που πρόκειται να παρατηρηθούν (Bellas-Velidis et al., 2010, 2012; Kontizas et al., 2011).

Στο πλαίσιο αυτό είναι απαραίτητη η δημιουργία συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. Τα θεωρητικά φάσματα που κατασκευάζονται με βάση τον κώδικα PÉGASE (σε συνεργασία με το IAP, France) απαιτούν μία λεπτομερή διερεύνηση για την τελική δημιουργία μίας ρεαλιστικής βιβλιοθήκης φασμάτων γαλαξιών. Στόχος αυτής της διατριβής είναι η διερεύνηση της σημασίας των θεωρητικών παραμέτρων του κώδικα και τα εύρη των τιμών για τα οποία δημιουργούνται φάσματα που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Τα παρατηρούμενα φάσματα που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή την εργασία είναι από τη γνωστή βιβλιοθήκη SDSS.

Η ανάγκη περιοχής των λιγότερο ρεαλιστικών φασμάτων της βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών των Tsalmantza, Kontizas et al. 2009 οδήγησε στη βελτιστοποίησή της (Karampelas et al., 2010, 2011, 2012). Τα βέλτιστα συνθετικά φάσματα γαλαξιών καταλογοποιήθηκαν και αναρτήθηκαν στο Κέντρο Αστρονομικών Δεδομένων CDS του Στρασβούργου (Centre de Données astronomiques de Strasbourg). Ο κατάλογος (Karampelas et al., 2011) είναι διαθέσιμος τόσο μέσω της υπηρεσίας αστρονομικών καταλόγων Vizier (<http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/538/A38>) , όσο και μέσω ανώνυμου ftp (<ftp://cdsarc.u-strasbg.fr> - 130.79.128.5).

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε μία νέα περισσότερο ρεαλιστική βιβλιοθήκη

συνθετικών φασμάτων γαλαξιών για τη φασματική περιοχή που καλύπτουν τα φωτόμετρα BP/RP (λλ 330 - 1000 nm), στην κατεύθυνση της περαιτέρω βελτιστοποίησης των βιβλιοθηκών θεωρητικών φασμάτων. Τελικά, ετέθησαν οι βάσεις για τη δημιουργία συνθετικών φασμάτων επεισοδιακής αστρογέννεσης και της πρώτης βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών για τη φασματική περιοχή που καλύπτει ο φασματογράφος RVS (λλ 847 - 874 nm) του δορυφόρου Gaia (Rocca-Volmerange et al., 2011). Στην παραπάνω διερεύνηση, και πέραν των απλών στατιστικών αναλύσεων, χρησιμοποιήθηκαν οι στατιστικές μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης και εύρεσης προτύπων SVM και PCA.

Η δομή της διατριβής είναι η εξής: Στο πρώτο Κεφάλαιο παρατίθενται απαραίτητες εισαγωγικές γνώσεις, ενώ στο δεύτερο Κεφάλαιο, που αποτελεί και το κυρίως μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής, παρουσιάζονται οι διαδικασίες ανάλυσης και αξιολόγησης των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στα θεωρητικά μοντέλα, καθώς και η επεξεργασία των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, με τα σχετικά αποτελέσματα. Το τρίτο Κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της διατριβής και τα μελλοντικά σχέδια που απορρέουν από αυτήν, ενώ στο τέταρτο Κεφάλαιο περιέχεται συνοδευτικό υλικό, όπως η βιβλιογραφία και κάποια παραρτήματα.

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι διαδικασίες και τα αποτελέσματα που περιέχονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή, ταξινομημένα ανά βιβλιοθήκη φασμάτων γαλαξιών (ημι-εμπειρική BP/RP, συνθετική BP/RP, νέα συνθετική BP/RP, φάσματα με επεισοδιακή αστρογέννεση BP/RP και συνθετική RVS).

Ημιεμπειρική βιβλιοθήκη (BP/RP)

Τα ημι-εμπειρικά φάσματα γαλαξιών κατασκευάστηκαν συνδυάζοντας τα συνθετικά φάσματα γαλαξιών με παρατηρηθέντα φάσματα γαλαξιών από το SDSS, την πλουσιότερη σχετική βάση δεδομένων. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο χ^2 και σε κάθε πραγματικό φάσμα προσαρτήθηκαν τα ακραία τμήματα του αντίστοιχου συνθετικού φάσματος. Στο τελικό ημι-εμπειρικό φάσμα αποδόθηκε ο φασματικός τύπος και όλες οι παράμετροι του συνθετικού φάσματος (Tsalmantza, Karampelas et al. 2012).

Τα προσομοιωμένα φάσματα γαλαξιών της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης ταξινομήθηκαν και παραμετροποιήθηκαν με τη στατιστική μέθοδο SVM. Τα φάσματα αυτά έχουν προσομοιωθεί για τρία μεγέθη ($G = 15, 18$ και 20) και τους έχει προστεθεί θόρυβος. Σχετικά με την ταξινόμηση, το ποσοστό των ορθών ταξινομήσεων βρέθηκε να είναι υψηλότερο για τα φάσματα με λαμπρότερο μέγεθος G , και ποικίλει από 80 % ($G = 20$) έως 92.2 % ($G = 15$). Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από τη μελέτη της μεταβολής του ποσοστού των επιτυχών προβλέψεων με το μέγεθος για κάθε φασματικό τύπο ξεχωριστά. Παρόλα αυτά, οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και οι ανώμαλοι γαλαξίες ταξι-

ινομούνται με μεγαλύτερη επιτυχία σε σχέση με τους σπειροειδείς γαλαξίες και τους QSFG (Quenched Star-Forming Galaxies). Επίσης, οι εσφαλμένα ταξινομημένοι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου ταξινομούνται κυρίως ως σπειροειδείς και το αντίστροφο, ενώ οι εσφαλμένα ταξινομημένοι ανώμαλοι γαλαξίες και οι QSFG ταξινομούνται κυρίως ως σπειροειδείς.

Από τη σύγκριση με τα αντίστοιχα τεστ στη συνθετική βιβλιοθήκη (Tsalmantza, Kontizas et al. 2009) προκύπτει ότι οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και οι ανώμαλοι γαλαξίες ταξινομούνται ορθότερα στην περίπτωση των ημι-εμπειρικών φασμάτων, ενώ οι σπειροειδείς γαλαξίες και οι QSFG ταξινομούνται ορθότερα στην περίπτωση των συνθετικών φασμάτων. Το υψηλότερο ποσοστό των επιτυχών προβλέψεων του φασματικού τύπου των συνθετικών φασμάτων ενδέχεται να ερμηνεύεται μερικώς από το υψηλό ποσοστό των φασμάτων QSFG επί του συνόλου των συνθετικών φασμάτων.

Στο πλαίσιο της παραμετροποίησης πραγματοποιήθηκε πρόβλεψη της ερυθρομετατόπισης, με τα σφάλματα να μειώνονται καθώς το μέγεθος γίνεται λαμπρότερο και να κυμαίνονται από 3.2 % ($G = 15$) έως και 9.0 % ($G = 20$). Η ίδια τάση παρατηρείται ανεξάρτητα του φασματικού τύπου και της ορθότητας ταξινόμησης του φασματικού τύπου. Παρόλα αυτά, οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και οι σπειροειδείς γαλαξίες χαρακτηρίζονται από χαμηλότερα σφάλματα πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, σε σχέση με τους ανώμαλους γαλαξίες και τους QSFG. Βρέθηκε επίσης ότι η πρόβλεψη της ερυθρομετατόπισης των ορθώς ταξινομημένων φασμάτων γαλαξιών είναι κατά 1 % έως 2 % καλύτερη σε σχέση με τα εσφαλμένως ταξινομημένα σφάλματα γαλαξιών, καθώς και ότι τα μέσα απόλυτα εκατοστιαία σφάλματα των προβλέψεων της ερυθρομετατόπισης είναι χαμηλότερα για γαλαξίες με $z \leq 0.2$ (κατά 0.1 % για τους ορθώς ταξινομημένους γαλαξίες, 0.2 % για το σύνολο των γαλαξιών και 0.8 % για τους γαλαξίες QSFG με $G = 20$).

Συνθετική βιβλιοθήκη (BP/RP)

Έγινε εφαρμογή της στατιστικής μεθόδου PCA ώστε να διερευνηθεί αν όλα τα φάσματα που δημιουργεί το θεωρητικό μοντέλο αντιστοιχούν σε πραγματικά φάσματα γαλαξιών. Η ποικιλομορφία των συνθετικών φασμάτων λόγω της πολυπλοκότητας του τρόπου κατασκευής τους, οφείλεται (α) στους διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων του ίδιου νόμου αστρικής δημιουργίας που δύνανται να αντιστοιχούν σε παρόμοια φάσματα, (β) στους διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων διαφορετικού νόμου αστρικής δημιουργίας που δύνανται να αντιστοιχούν σε παρόμοια φάσματα, και (γ) στους συνδυασμούς παραμέτρων που δύνανται να αντιστοιχούν σε φάσματα που δεν έχουν τυπική μορφή. Βρέθηκε ότι η βιβλιοθήκη των συνθετικών φασμάτων μπορεί να αναλυθεί αποτε-

λεσματικά με τη χρήση μόνο των δύο κυριότερων συνιστωσών-ιδιοδιανυσμάτων PC1 και PC2, με τις οποίες επιτυγχάνεται ένα πολύ χαμηλό μέσο σφάλμα ανακατασκευής (reconstruction error) 2% και στις οποίες περιέχεται το 99 % της συνολικής διακύμανσης, επιτρέποντας έτσι τη δραστική μείωση των διαστάσεων (dimensionality reduction) χωρίς σημαντική απώλεια πληροφορίας. Μελετήθηκε επίσης η ευαισθησία των ιδιοδιανυσμάτων αυτών με την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή της μεθόδου PCA σε επιμέρους δείγματα φασμάτων, όπου και διαπιστώθηκε η μη ευαισθησία τους, καθώς και η ευστάθειά τους σε σχέση με το φασματικό τύπο. Βρέθηκε πως το ιδιοδιάνυσμα PC1 είναι διαφορετικό για κάθε φασματικό τύπο ξεχωριστά καθώς αυτό σχετίζεται με το μεγαλύτερο μερίδιο της διακύμανσης και, συνεπώς, αντικατοπτρίζει τις κυριότερες διαφορές μεταξύ των διαφορετικών φασματικών τύπων, ενώ το PC2 παραμένει πρακτικώς αμετάβλητο.

Ακολούθησε η κατασκευή του διαγράμματος των δύο κυριότερων συνιστωσών, ώστε να διερευνηθεί η ύπαρξη αλληλεπικαλύψεων μεταξύ των διαφορετικών φασματικών τύπων και να μελετηθούν οι συνδυασμοί των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας που προκαλούν τις αλληλεπικαλύψεις αυτές. Ανακαλύφθηκε η ύπαρξη εκτεταμένων αλληλεπικαλύψεων, με τους σπειροειδείς γαλαξίες να αλληλεπικαλύπτονται ισχυρώς με τους γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και τους QSFG, και τους τελευταίους να αλληλεπικαλύπτονται ισχυρώς με τους ανώμαλους γαλαξίες. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μία λεπτομερής παράλληλη ανάλυση του σεναρίου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας κάθε φασματικού τύπου και των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της μεθόδου PCA, όπου βρέθηκαν τα γενικά κριτήρια βάσει των οποίων δύνανται να περικοπούν από τη συνθετική βιβλιοθήκη γαλαξιακών φασμάτων τα μη επιθυμητά φάσματα. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή των κριτηρίων αυτών (Karampelas et al., 2010, 2012), περικόπτοντας από τη βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων (α) γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου με γραμμές εκπομπής (ομοιότητα με σπειροειδείς) ή με εξαιρετικά ασθενή αρχικό ρυθμό αστρικής δημιουργίας, (β) σπειροειδείς γαλαξίες με πολύ υψηλές τιμές της παραμέτρου p_2 (ομοιότητα με ανώμαλους γαλαξίες και QSFG), (γ) ανώμαλους γαλαξίες και QSFG με εξαιρετικά υψηλές τιμές των παραμέτρων p_2 και t_{infall} (όμοιοι μεταξύ τους) και (δ) QSFG χωρίς γραμμές εκπομπής (ομοιότητα με σπειροειδείς). Τα βέλτιστα συνθετικά φάσματα γαλαξιών καταλογοποιήθηκαν και αναρτήθηκαν στο Κέντρο Αστρονομικών Δεδομένων CDS του Στρασβούργου (Centre de Données astronomiques de Strasbourg).

Ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης, οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου σχηματίζουν μία πλήρως ξεχωριστή ομάδα στο επίπεδο των ιδιοδιανυσμάτων PC1 - PC2, η οποία πλέον δεν συμπλέκεται με αυτή των σπειροειδών γαλαξιών και δεν περιέχει γαλαξίες με μη επιθυμητό ρυθμό αστρικής δημιουργίας,

ενώ οι αλληλεπικαλύψεις μεταξύ σπειροειδών και ανωμάτων γαλαξιών και μεταξύ σπειροειδών και QSFG έχουν περιοριστεί σε μία σχετικά μικρή περιοχή του χώρου των δύο κυριότερων συνιστωσών. Επίσης, η υψηλή συγκέντρωση όμοιων μεταξύ τους φασμάτων μεταγενέστερου φασματικού τύπου έχει περιοριστεί αισθητά. Στις θετικές συνέπειες της βελτιστοποίησης της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών περιλαμβάνεται και ο περιορισμός των αλληλεπικαλύψεων στο διάγραμμα των δύο χρωμάτων $(g - r) - (r - i)$, ως απόρροια του αντίστοιχου περιορισμού στο χώρο των δύο κυριότερων ιδιοδιανυσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, είναι πλέον διακριτή η ομαδοποίηση των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου στην περιοχή $(g - r) > 0.8$, καθώς και η εξάλειψη της εκτεταμένης αλληλεπικάλυψης μεταξύ σπειροειδών και QSFG στην περιοχή $0.5 < (g - r) < 0.6$, ενώ ταυτόχρονα έχει διατηρηθεί η ικανοποιητική κάλυψη των παρατηρήσεων από το SDSS.

Τα προσομοιωμένα φάσματα γαλαξιών τόσο της αρχικής συνθετικής βιβλιοθήκης (Tsalmantza, Kontizas et al. 2009) όσο και της βέλτιστης συνθετικής βιβλιοθήκης (Karampelas et al., 2012) ταξινομήθηκαν και παραμετροποιήθηκαν με τη στατιστική μέθοδο SVM (Support Vector Machines). Η συγκεκριμένη ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε δύο διαφορετικά δείγματα: «καθαρά» φάσματα χωρίς θόρυβο, απορρόφηση ή ερυθρομετατόπιση και «ρεαλιστικά» φάσματα μεγέθους $G = 15$. Σχετικά με την ταξινόμηση, η απόδοση του UGC στην ταξινόμηση των καθαρών προσομοιωμένων φασμάτων ανέρχεται σχεδόν στο 100 %. Οι θετικές συνέπειες της βελτιστοποίησης της συνθετικής βιβλιοθήκης εντοπίστηκαν κατά την επεξεργασία του δείγματος των ρεαλιστικών φασμάτων, όπου ειδικά στην περίπτωση των φασμάτων προγενέστερου φασματικού τύπου η αύξηση της απόδοσης ανήλθε περίπου στο 25 %. Η ταξινόμηση των φασμάτων των σπειροειδών και των ανωμάτων γαλαξιών βελτιώθηκε ελαφρώς (~ 3 %), ενώ η απόδοση του UGC στην περίπτωση των γαλαξιών QSFG, η οποία ήταν ήδη υψηλή, έμεινε πρακτικά αμετάβλητη. Σχετικά με την παραμετροποίηση, οι περισσότερες παράμετροι υπολογίστηκαν με μικρότερο σφάλμα στα βέλτιστα προσομοιωμένα φάσματα σε σχέση με τα αρχικά φάσματα. Δεν είναι όμως προφανής η αξιολόγηση των τιμών των σφαλμάτων αυτών, λόγω κυρίως του γεγονότος ότι η μεταβολή των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας κατά την κατασκευή των συνθετικών φασμάτων δεν επιδρά γραμμικά στη μορφή των φασμάτων αυτών.

Από τα παραπάνω προέκυψε ότι πράγματι η βελτιστοποίηση της βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών μέσω της διερεύνησης του ιστορικού αστρικής δημιουργίας των διαφόρων φασματικών τύπων και της εφαρμογής της στατιστικής μεθόδου PCA (Karampelas et al., 2012) οδήγησε στην καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το μοντέλο PÉGASE κατασκευάζει συνθετικά φάσματα, καθώς και των δυνατοτήτων των στατιστικών μεθόδων

ανάλυσης και επεξεργασίας μεγάλων βάσεων δεδομένων.

Νέα συνθετική βιβλιοθήκη (BP/RP)

Τα νέα κριτήρια δημιουργίας συνθετικών φασμάτων γαλαξιών και η συνεχής ανάγκη περαιτέρω βελτίωσης του τρόπου δημιουργίας νέων, ρεαλιστικότερων φασμάτων για τις ανάγκες του συστήματος UGC, οδήγησαν στη δημιουργία της νέας συνθετικής βιβλιοθήκης με τη χρήση του κώδικα PÉGASE.2. Τα νέα συνθετικά φάσματα (α) αντιστοιχούν σε εύρη παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας που είναι συνεπή με τη διαδικασία βελτιστοποίησης των συνθετικών φασμάτων, (β) περιέχουν την ειδική περίπτωση των λαμπρών κόκκινων γαλαξιών LRG, οι οποίοι θεωρήθηκαν ως γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου μεγάλης ερυθρομετατόπισης, (γ) έχουν κατασκευαστεί για διάφορες τιμές κλίσης (inclination) του δίσκου, ενώ (δ) έχει ληφθεί υπόψη το εξελικτικό στάδιο που αντιστοιχεί στην ερυθρομετατόπισή τους.

Οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου δημιουργήθηκαν για τυχαίες τιμές της ερυθρομετατόπισης στο εύρος 0.0 - 0.6, ενώ οι σπειροειδείς γαλαξίες, οι ανώμαλοι γαλαξίες και οι QSFG δημιουργήθηκαν για τυχαίες τιμές της ερυθρομετατόπισης στο εύρος 0.0 - 0.2 και για πέντε τιμές της γωνίας κλίσης. Επίσης, κατασκευάστηκε και ένα δείγμα γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου με μηδενική ερυθρομετατόπιση, καθώς και από ένα δείγμα σπειροειδών γαλαξιών, ανώμαλων γαλαξιών και QSFG με μηδενική ερυθρομετατόπιση και μέση γωνία κλίσης. Η στατιστική ανάλυση των φασμάτων της νέας συνθετικής βιβλιοθήκης είναι σε εξέλιξη.

Φάσματα με επεισοδιακή αστρογέννεση (BP/RP)

Το επόμενο στάδιο της εξέλιξης της βιβλιοθήκης είναι η εισαγωγή νέων σεναρίων αστρικής δημιουργίας, όπως τα σεναρία επεισοδιακής αστρογέννεσης, όπου τα άστρα γεννιούνται κατά τη διάρκεια εξάρσεων αστρικής δημιουργίας. Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση τέτοιων σεναρίων, τα οποία αντιμετωπίστηκαν ως παραλλαγή του σεναρίου των ανώμαλων γαλαξιών, και ορίστηκαν οι κατάλληλες παράμετροι που ελέγχουν το ρυθμό αστρικής δημιουργίας. Οι συγκεκριμένες παράμετροι αφορούν τον αριθμό, τη χρονική στιγμή έναρξης, τη διάρκεια και την ένταση κάθε έξαρσης αστρικής δημιουργίας. Στη συνέχεια ετέθησαν περιορισμοί στις τιμές τις οποίες δύνανται να λάβουν οι παράμετροι αυτές, οδηγώντας τελικά στη δημιουργία 240 προτύπων σεναρίων επεισοδιακής αστρογέννεσης για κάθε επιλεγμένη καταναλωθείσα ποσότητα αερίου του σεναρίου των ανώμαλων γαλαξιών. Η δημιουργία των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών επεισοδιακής αστρογέννεσης με το μοντέλο PÉGASE βρίσκεται σε εξέλιξη.

Συνθετική βιβλιοθήκη (RVS)

Η δημιουργία της πρώτης βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών υψηλής διακριτικής ικανότητας για τον φασματογράφο RVS του δορυφόρου Gaia απαιτεί την ενσωμάτωση μίας αντίστοιχης βιβλιοθήκης αστρικών φασμάτων υψηλής διακριτικής ικανότητας στον κώδικα PÉGASE.2. Από τις διαθέσιμες αστρικές βιβλιοθήκες υψηλής διακριτικής ικανότητας επιλέχθηκε εκείνη των Munari et al. (2005), η οποία άλλωστε κατασκευάστηκε, μεταξύ άλλων, και για τον φασματογράφο RVS. Εν αναμονή της ενσωμάτωσής της στον κώδικα PÉGASE.2, πραγματοποιήθηκε μία σειρά από προκαταρκτικές δοκιμές με τη χρήση της υπάρχουσας συνθετικής βιβλιοθήκης αστρικών φασμάτων χαμηλής διακριτικής ικανότητας BaSeL. Δημιουργήθηκαν συνθετικά φάσματα που αντιστοιχούν στους γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου, στους σπειροειδείς γαλαξίες και στους ανώμαλους γαλαξίες και μελετήθηκαν τα τμήματα των φασμάτων που αντιστοιχούν στην περιοχή μηκών κύματος του οργάνου RVS, και ιδιαίτερα η τριπλέτα του ασβεστίου. Αν και η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά της τριπλέτας του ασβεστίου είναι εξαιρετικά δύσκολη λόγω χαμηλής ανάλυσης, παρατηρήθηκαν διαφοροποιήσεις στη χρονική εξέλιξή της σε κάθε φασματικό τύπο. Η ενσωμάτωση της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων αστέρων υψηλής διακριτικής ικανότητας των (Munari et al., 2005) στο μοντέλο PÉGASE είναι σε εξέλιξη και αναμένονται τα πρώτα σχετικά αποτελέσματα.

Abstract

During the five years of the Gaia satellite operations, a huge database of a billion objects will be obtained, including stars of the Milky Way and the Local Group, galaxies, quasars, exoplanets, supernova and Solar System objects. This work was performed in the context of the preparation of the ESA Gaia mission, specifically for the needs of the Unresolved Galaxy Classifier (UGC), an algorithm which is going to classify and parametrize the millions of galaxy spectra Gaia will observe (Bellas-Velidis et al., 2010, 2012; Kontizas et al., 2011).

In order to develop and operate UGC, libraries of synthetic galaxy spectra are required. These theoretical templates were created with PÉGASE code (in cooperation with IAP). The aim of this Thesis is to investigate the range of the values of some key PÉGASE parameters, for which realistic synthetic spectra are produced. SDSS observed spectra were also used to validate the synthetic ones and test the performance of UGC.

The need to truncate the less realistic synthetic spectra from the library of Tsalmantza, Kontizas et al. 2009, resulted to the optimization of this library (Karampelas et al., 2010, 2011, 2012). The optimum synthetic galaxy spectra were catalogued in CDS (Centre de Données astronomiques de Strasbourg). This catalogue (Karampelas et al., 2011) is available through Vizier (<http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/538/A38>) and through anonymous ftp (cdsarc.u-strasbg.fr - 130.79.128.5).

In the context of the further optimization of the libraries of theoretical galaxy spectra, a more realistic library was produced for the Gaia BP/RP photometers wavelength range (330 - 1000 nm). Additionally, an analysis has been initiated in order to create both synthetic galaxy spectra with episodic star formation for BP/RP and the first set of high-resolution synthetic galaxy spectra (Rocca-Volmerange et al., 2011) for the Gaia RVS spectrograph wavelength range (847 - 874 nm).

To accomplish the above, artificial intelligence and pattern recognition techniques were used, namely Support Vector Machines (SVM) and Principal

Components Analysis (PCA).

The structure of the Thesis is the following: The first chapter is introductory, the second chapter presents the analysis and the evaluation of the parameters of the theoretical models and the relevant data processing and results, the third chapter lists the conclusions and the future plans, while the last chapter contains the references and an Annex.

Data analysis and results included in this Thesis are summarized below, classified per library of galaxy spectra (BP/RP semi-empirical, synthetic, new synthetic and spectra with episodic star formation and RVS synthetic).

Semi-empirical library (BP/RP)

Semi-empirical galaxy spectra were created by matching synthetic galaxy spectra with SDSS galaxy spectra. A χ^2 goodness of fit was implemented to the spectra and the left and right wings of the synthetic spectra were adjusted to the corresponding parts of the matching observed spectra, producing the final semi-empirical spectra. For each of these semi-empirical spectra the spectral type of the corresponding synthetic spectrum was adopted (Tsalmantza, Karamelas et al. 2012).

The semi-empirical spectra were simulated for the Gaia instrument characteristics for three magnitudes ($G = 15, 18$ and 20) with the addition of noise. The simulated spectra were classified and parametrized with the SVM method. The percentage of the correct classifications was higher for brighter G -magnitude, ranging from 80 % ($G = 20$) to 92.2 % ($G = 15$). The same trend stands for each spectral type separately. However, Early-type and Irregular galaxies were better classified than Spirals and QSFG. Furthermore, the erroneously classified Early-type galaxies were classified mainly as Spirals and vice versa, while the erroneously classified irregular galaxies and QSFG were classified mainly as spirals.

From the comparison of the above results with the corresponding results from the library of synthetic galaxy spectra (Tsalmantza, Kontizas et al. 2009) arises that the Early-type and Irregular galaxies were better classified in the semi-empirical case, while the contrary stands for Spirals and QSFG. The spectral type classification was in total more successful in the case of synthetic spectra, partially explained by the higher percentage of QSFG galaxies among them.

The errors of the prediction of the redshift (parametrization) was lower for brighter G -magnitude, ranging from 3.2 % ($G = 15$) to 9.0 % ($G = 20$). The same trend stands independently of the spectral type and the classification correctness. However, Early-type and Spiral galaxies were better parametrized than Irregulars and QSFG. Furthermore, the prediction of the

redshift of the correctly classified galaxies was better than the prediction of the erroneously classified ones by 1 % to 2%. Additionally, the mean absolute percentage errors of the redshift prediction were lower for $z \leq 0.2$ galaxies (by 0.1 % for the correctly classified galaxies, by 0.2 % for all galaxies and by 0.8 % for QSFG with $G = 20$).

Synthetic library (BP/RP)

The PCA method was implemented to the synthetic spectra to perform the investigation of how realistic these theoretical templates are. The diversity of the synthetic spectra originates from the complexity induced by the theoretical assumptions under which they have been created. More specifically, it is due to (a) the different combinations of parameter values of the same star-formation law which may correspond to similar spectra, (b) the different combinations of parameter values of different star-formation laws which may correspond to similar spectra, and (c) the combinations of parameter values which may correspond to unrealistic or non-typical spectra.

It was found that the library of synthetic galaxy spectra can be efficiently analyzed by only using the first two Principal Components - eigenspectra PC1 and PC2, which correspond to a very low mean reconstruction error of 2% and contain the 99 % of the total variance, thus allowing for a drastic dimensionality reduction without a significant loss of information. The stability of the most significant Components was confirmed after repeatedly implementing the PCA method to subsamples of synthetic spectra. PC1 was found to differ among the various spectral types, since it is correlated with the higher variance fraction, hence reflecting the major differences among these types. PC2 practically remains unchanged.

Subsequently, the synthetic spectra were projected in the diagram of the first two Principal Components PC1 and PC2. Extended overlaps were discovered in this diagram, with Spiral galaxies been highly-overlapped with Early-type galaxies and QSFG, and Irregular galaxies been highly-overlapped with QSFG. At the same time, the star formation scenarios of each spectral type were investigated in detail and, together with the results from the PCA implementation, they led to specific criteria to truncate the non-desirable synthetic galaxy spectra from the synthetic library. The optimization of the library was done by applying these criteria to the synthetic spectra (Karampelas et al., 2010, 2012), truncating (a) Early-type galaxies with emission lines (similarity with Spirals) or with very weak star formation rate, (b) Spiral galaxies with high p_2 values (similarity with Irregulars and QSFG), (c) Irregular galaxies and QSFG with extremely high values of p_2 and t_{infall} (similar to each other) and (d) QSFG without emission lines (sim-

ilarity with Spirals). The optimum synthetic galaxy spectra are available at the CDS (Centre de Données astronomiques de Strasbourg) via anonymous ftp to cdsarc.u-strasbg.fr (130.79.128.5) or via <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/538/A38>.

As a result of the optimization, the Early-type galaxies form a distinct group in the PC1 - PC2 diagram, no longer overlapping with Spiral galaxies and lacking of galaxies with non-desirable weak star formation rates. Additionally, Spiral - QSFG overlaps have been significantly limited, together with the existence of similar to each other late type galaxies. The overlaps in the $(g - r) - (r - i)$ two-color diagram have also been limited, as a consequence of the optimization. More specifically, the Early-type galaxies form a distinct group at $(g - r) > 0.8$, while the extended overlap between Spirals and QSFG at $0.5 < (g - r) < 0.6$ no longer exists, with the satisfactory coverage of the SDSS observation having been retained.

The simulated galaxy spectra of the synthetic library (Tsalmantza, Kontizas et al. 2009) and the optimized synthetic library (Karampelas et al., 2012) were classified and parametrized by using the SVM method in two different $G = 15$ samples: spectra with and without noise, extinction and redshift. In the first case, UGC performance was approximately 100 %. In the second case, the optimized Early-type galaxies were better classified by 25 % and Spirals and Irregulars by 3 %, while the classification performance in QSFG spectra remained unchanged, being already high. Regarding parametrization, most of the values of the various parameter were predicted more accurately in the optimized spectra. Nevertheless, the parametrization errors cannot be easily interpreted, since the different values of the parameters do not linearly affect the shape of the final spectra.

Conclusively, the optimization of the library of synthetic galaxy spectra achieved through the investigation of the star formation histories of the various spectral types and the application of the PCA method (Karampelas et al., 2012), led to a better understanding of PÉGASE modeling and of some statistical methods which are able to efficiently analyze and process huge databases.

New synthetic library (BP/RP)

The existence of criteria to create optimal synthetic galaxy spectra and the constant need of even more realistic spectra for UGC led to the creation of a new synthetic library with PÉGASE.2 code. These spectra (a) correspond to ranges of star formation rate parameters values which take into account the optimization criteria, (b) include the special case of Luminous Red Galaxies (LRG), which have been modeled as high-redshift Early-type galaxies,

(c) have been constructed for various values of disk inclination, and (d) have been evolutionary corrected.

Early-type galaxies have been created both for zero redshift values and for random values in the range 0.0 - 0.6, while Spiral galaxies, Irregulars and QSFG have been created for zero redshift, for random redshift values in the range 0.0 - 0.2 and for five different inclination values. The statistical analysis of these spectra is ongoing.

Spectra with episodic star formation (BP/RP)

In episodic star formation, stars are born during bursts of star formation. An investigation of such scenarios, being modeled as an alternative version to scenarios of Irregular galaxies, has been started, with the corresponding star formation rate parameters having been defined. These parameters control the number, the starting time, the duration and the intensity of each burst, and appropriate constraints have been applied to them, resulting in the creation of 240 scenarios. The creation of the corresponding spectra with PÉGASE is ongoing.

Synthetic library (RVS)

The creation of the first library of high-resolution synthetic galaxy spectra for the RVS spectrograph of the Gaia satellite requires the inclusion of an appropriate library of high-resolution synthetic stellar spectra to PÉGASE code. The stellar library of Munari et al. (2005), which has been created specifically for RVS, was selected among the relevant available libraries. A number of preliminary tests have been implemented using BaSeL, the stellar library included in PÉGASE.2. Synthetic galaxy spectra of Early-type, Spiral and Irregular galaxies have been created and the RVS wavelength range has been investigated, where the dominant spectral characteristic is the calcium triplet. The inclusion of the library of Munari et al. (2005) to PÉGASE is ongoing.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	23
1.1	Διαστημική αποστολή Gaia	24
1.1.1	Εισαγωγή	24
1.1.2	Τόπος και εγκαταστάσεις εκτόξευσης	25
1.1.3	Επιχειρησιακή φάση του δορυφόρου Gaia	26
1.1.4	Διαστημικό σκάφος	28
1.1.5	Φωτόμετρα BP/RP και φασματογράφος RVS	36
1.1.6	Κοινοπραξία DPAC	38
1.2	Σύστημα UGC	41
1.2.1	Πακέτο εργασίας GWP-S-832	41
1.2.2	Λογισμικό UGC	42
1.3	Το μοντέλο PÉGASE	44
1.4	Βιβλιοθήκες γαλαξιακών φασμάτων για τη Gaia	47
1.4.1	Συνθετική βιβλιοθήκη	47
1.4.2	Ημι-εμπειρική βιβλιοθήκη	49
1.5	Εξόρυξη δεδομένων και μηχανική μάθηση	51
1.5.1	Εξόρυξη δεδομένων	51
1.5.2	Μηχανική μάθηση	51
1.6	Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (PCA)	53
1.6.1	Εισαγωγή	53
1.6.2	Περιγραφή	53
1.6.3	Χαρακτηριστικά	54
1.6.4	Ερευνητικές εφαρμογές	55
1.7	Support Vector Machines (SVM)	57
2	Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων	59
2.1	Βιβλιοθήκη ημι-εμπειρικών φασμάτων	60
2.1.1	Τυπικά φάσματα	60
2.1.2	Ταξινόμηση και παραμετροποίηση	60
2.2	Βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων	78

2.2.1	Διερεύνηση παραμέτρων συνθετικών φασμάτων	78
2.2.2	Επιμέρους διερεύνηση των φασματικών τύπων	88
2.2.3	Επιλογή των βέλτιστων φασμάτων	117
2.2.4	Κατάλογος βέλτιστων φασμάτων	121
2.2.5	Προσομοιωμένη βιβλιοθήκη	122
2.3	Νέα συνθετική βιβλιοθήκη	131
2.3.1	Παράμετροι ρυθμού αστρικής δημιουργίας	131
2.3.2	Εξελικτική διόρθωση	133
2.3.3	Εσωτερική απορρόφηση	135
2.3.4	Λαμπροί κόκκινοι γαλαξίες	135
2.3.5	Τελική βιβλιοθήκη	136
2.4	Συνθετικά φάσματα γαλαξιών με επεισοδιακή αστρογέννεση . .	145
2.4.1	Σενάρια επεισοδιακής αστρογέννεσης	145
2.5	Συνθετική βιβλιοθήκη υψηλής διακριτικής ικανότητας	148
2.5.1	Τριπλέτα ασβεστίου (CaII)	148
2.5.2	Αστρικές βιβλιοθήκες υψηλής διακριτικής ικανότητας	149
2.5.3	Εισαγωγή κατάλληλης αστρικής βιβλιοθήκης στον κώδι- κα PÉGASE	150
3	Συμπεράσματα και μελλοντικά σχέδια	159
3.1	Συμπεράσματα	160
3.1.1	Ημιεμπειρική βιβλιοθήκη	160
3.1.2	Βελτιστοποίηση συνθετικής βιβλιοθήκης	160
3.1.3	Νέα συνθετική βιβλιοθήκη	162
3.1.4	Φάσματα με επεισοδιακή αστρογέννεση	163
3.1.5	Συνθετική βιβλιοθήκη υψηλής διακριτικής ικανότητας	163
3.2	Μελλοντικά σχέδια	164
4	Παραρτήματα, βιβλιογραφία και κατάλογοι	167
	Παράρτημα Α: Δείγμα βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών . .	168
	Παράρτημα Β: Κύριες συνιστώσες των βέλτιστων φασμάτων	174
	Παράρτημα Γ: Προβολές των βέλτιστων φασμάτων στις κύριες συνιστώσ- ες	178
	Βιβλιογραφία	181
	Κατάλογος Σχημάτων	201
	Κατάλογος Πινάκων	204

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο περιέχει τις εισαγωγικές γνώσεις που είναι απαραίτητες για τη μελέτη και την καλύτερη κατανόηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Περιλαμβάνει την παρουσίαση της Ευρωπαϊκής διαστημικής αποστολής Gaia και του συστήματος ταξινόμησης και παραμετροποίησης γαλαξιακών φασμάτων Unresolved Galaxy Classifier (UGC), την περιγραφή του μοντέλου δημιουργίας φασμάτων γαλαξιών PÉGASE.2, τις προ της διατριβής αυτής βιβλιοθήκες συνθετικών φασμάτων γαλαξιών για τη Gaia, και τέλος τις σημαντικότερες στατιστικές μεθόδους ανάλυσης δεδομένων τέτοιου είδους.

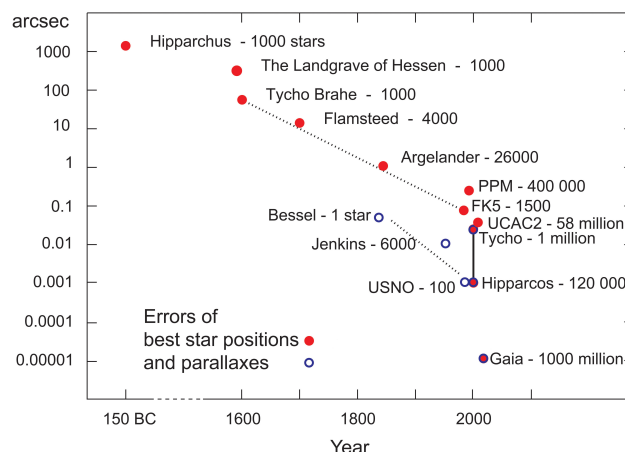
1.1 Διαστημική αποστολή Gaia

1.1.1 Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια της πενταετούς αποστολής του Ευρωπαϊκού δορυφόρου Γαία (Gaia), ο οποίος θα εκτοξευτεί το 2013, θα πραγματοποιηθεί η μεγαλύτερη έως τώρα καταγραφή αστροφυσικών αντικειμένων του Γαλαξία μας, η οποία θα περιέχει τις θέσεις, την ιδία κίνηση, τα φάσματα και άλλες αστροφυσικές παραμέτρους 10^9 αστροφυσικών αντικειμένων. Το αμυδρότερο αντικείμενο που αναμένεται να παρατηρηθεί θα είναι μεγέθους $G \sim 20$ (μη φιλτραρισμένο - λευκό φως), το οποίο αντιστοιχεί σε μέγεθος $V = 20 - 25 mag$, ανάλογα με τον φασματικό τύπο (Jordi et al., 2006). Από τις παρατηρήσεις αυτές θα καταστεί δυνατό να κατασκευαστεί ένας ακριβής τρισδιάστατος χάρτης του Γαλαξία μας.

Πέραν όμως των άστρων του Γαλαξία μας θα ανιχνευθούν και άστρα γειτονικών γαλαξιών του Τοπικού Σμήνους, καθώς και περίπου 10^6 γαλαξίες, $5 \cdot 10^5$ κβάζαρς, 10^5 εξωπλανήτες, 10^5 υπερκαινοφανείς και έως 10^6 αντικείμενα του Ηλιακού μας Συστήματος. Μία βάση δεδομένων τέτοιου είδους θα αποτελέσει το αναγκαίο υλικό για νέες επιστημονικές ανακαλύψεις και μελέτες που θα καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος της σύγχρονης Αστροφυσικής. Ενδεικτικά αναφέρονται η δημιουργία, το ιστορικό αστρικής δημιουργίας, η εξέλιξη, η κινηματική και η δυναμική του Γαλαξία, η ταξινόμηση και παραμετροποίηση αστερών και γαλαξιών, η κατανομή της σκοτεινής ύλης, η συνάρτηση λαμπρότητας πρωτοαστέρων, η δομή και η εξέλιξη αστερών όλων των φασματικών τύπων, οι τροχίες και οι μάζες εξωπλανητών, η μελέτη καφέ και λευκών νάνων, τα αντικείμενα του Ηλιακού συστήματος που κινούνται πλησίον της Γης, οι διπλοί αστέρες, τα αστρικά σμήνη, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του Γαλαξία μας και των Νεφών του Μαγγελάνου, οι δομές μεγάλης κλίμακας του σύμπαντος μέσω της μελέτης των κβάζαρς και οι βαρυτικοί φακοί. Ο τελικός κατάλογος αναμένεται τρία έτη ύστερα από τη λήξη της αποστολής.

Όντας κατά βάση ένας αστρομετρικός δορυφόρος, η Gaia θα αποτελέσει το μεγαλύτερο έως τώρα επίτευγμα στην ιστορία της αστρομετρίας, με ακρίβεια περίπου ίση με $24 \mu arcsec$. Σε σύγκριση με τον δορυφόρο Ίππαρχο (Hipparcos), θα ανιχνεύσει έως και 10 000 περισσότερα αστροφυσικά αντικείμενα με ακρίβεια έως και 100 φορές μεγαλύτερη. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη στην ακρίβεια των μετρήσεων των θέσεων και των παραλλάξεων των αστερών από την αρχαιότητα έως σήμερα, όπου γίνεται αντιληπτή η αναμενόμενη ποιότητα των παρατηρήσεων του δορυφόρου Gaia.



Σχήμα 1.1: Η εξέλιξη της ακρίβειας των αστρομετρικών μετρήσεων (σε δευτερόλεπτα τόξου) από την αρχαιότητα έως σήμερα. Copyright: Eric Høg.

1.1.2 Τόπος και εγκαταστάσεις εκτόξευσης

Η εκτόξευση του δορυφόρου Gaia αναμένεται να πραγματοποιηθεί το 2013 από το διαστημικό κέντρο της γαλλικής Γουιάνα (Guiana Space Centre - CSG), με ένα όχημα εκτόξευσης Soyuz. Η γαλλική Γουιάνα βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα της λατινικής Αμερικής. Η τοποθεσία εκτόξευσης βρίσκεται στην περιοχή Κουρού (Kourou), η οποία είναι ιδανική για εκτοξεύσεις λόγω της εγγύτητάς της με τον Ισημερινό της Γης και της σχετικής ασφάλειας που προσφέρει.

Η γαλλική Γουιάνα είναι μία ιδιαίτερα αραιοκατοικημένη χώρα, όπου το 90 % περίπου της έκτασής της καλύπτεται από τροπικά δάση. Επιπλέον, δεν υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας κυκλωνικών συστημάτων ή σεισμικής δραστηριότητας, φαινόμενα τα οποία θα μπορούσαν να δυσχεράνουν την προετοιμασία και τη διαδικασία μίας εκτόξευσης ή να καταπονήσουν τις εγκαταστάσεις.

Η τοποθεσία εκτόξευσης βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος $5^{\circ}3'$, σε απόσταση μόλις 500 χιλιομέτρων βόρεια του ισημερινού. Οι εκτοξεύσεις οι οποίες πραγματοποιούνται από περιοχές κοντά στον ισημερινό έχουν το πλεονέκτημα να χρησιμοποιούν την υψηλή ενέργεια περιστροφής της Γης. Έτσι, οι εκτοξευόμενοι πύραυλοι που μεταφέρουν τους δορυφόρους επιταχύνονται περισσότερο και δύνανται να μεταφέρουν μικρότερες ποσότητες καυσίμων, μειώνοντας το κόστος της εκάστοτε διαστημικής αποστολής και επισπεύδοντας την περάτωσή της. Το

φαινόμενο αυτό της μεταβολής της τροχιάς και της ταχύτητας ενός διαστημικού σκάφους λόγω της σχετικής κίνησης και της βαρύτητας ενός ουρανού αντικειμένου ονομάζεται ελιγμός βαρυτικής ενίσχυσης (gravity-assist maneuver) ή φαινόμενο σφενδόνης (slingshot effect, <http://www2.jpl.nasa.gov/basics/bsf4-1.php>).

Οι εγκαταστάσεις από τις οποίες θα εκτοξευτεί ο δορυφόρος Gaia ονομάζονται Ensemble de Lancement Soyuz (ELS) και αποτελούνται από τρεις ζώνες, (α) την πλατφόρμα εκτόξευσης του οχήματος εκτόξευσης, (β) το κτίριο οριζόντιας ενσωμάτωσης και δοκιμών του οχήματος εκτόξευσης, και (γ) το κέντρο ελέγχου.

Όχημα εκτόξευσης

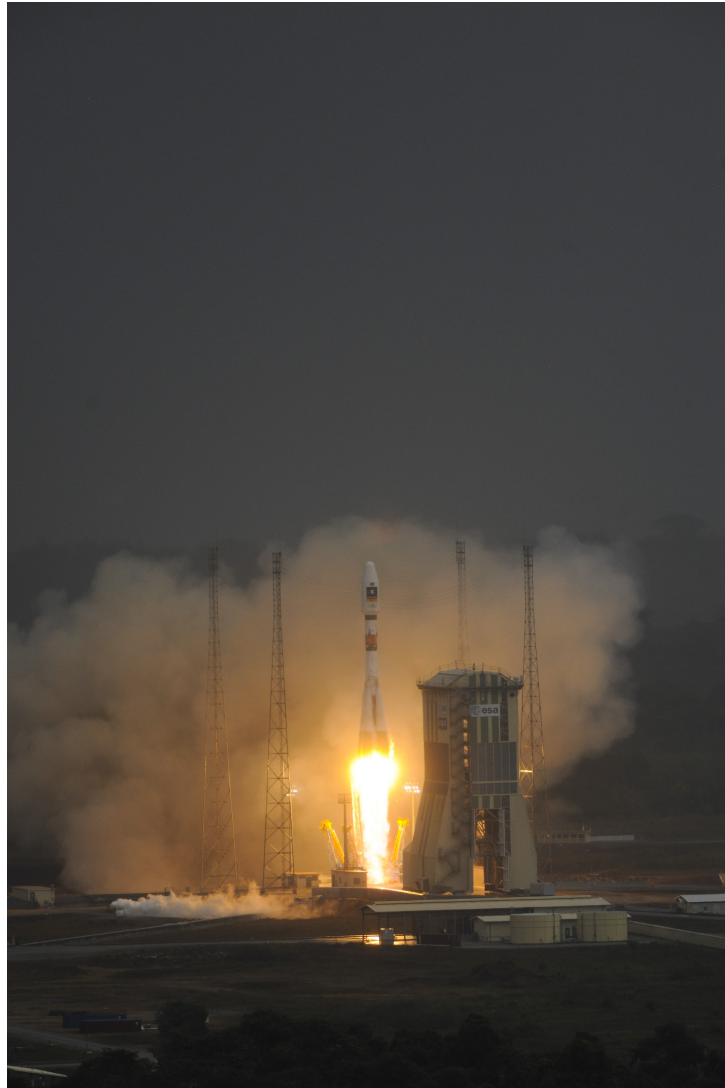
Ο δορυφόρος Gaia είναι ειδικά σχεδιασμένος ώστε να τοποθετηθεί σε ένα όχημα εκτόξευσης τύπου Soyuz-STB/Fregat, το οποίο θα τον μεταφέρει στο διάστημα. Το όχημα αποτελείται από τέσσερα επίπεδα, όπου το πρώτο (κατώτερο) επίπεδο θα χρησιμοποιηθεί για την απογείωση του οχήματος, το δεύτερο και το τρίτο για να θέσει το όχημα σε τροχιά γύρω από τη Γη, και το τέταρτο (ανώτερο) επίπεδο για να μεταφέρει τον δορυφόρο στο σημείο Lagrange L2.

Στις 21 Οκτωβρίου 2011 ένα όχημα εκτόξευσης Soyuz, έχοντας την ίδια διάταξη με αυτήν που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση του δορυφόρου Gaia, απογείωθηκε από το διαστημικό κέντρο της γαλλικής Γουιάνα, φέροντας τους δύο πρώτους δορυφόρους Galileo. Η στιγμή της εκτόξευσης αποτυπώνεται στο σχήμα 1.2.

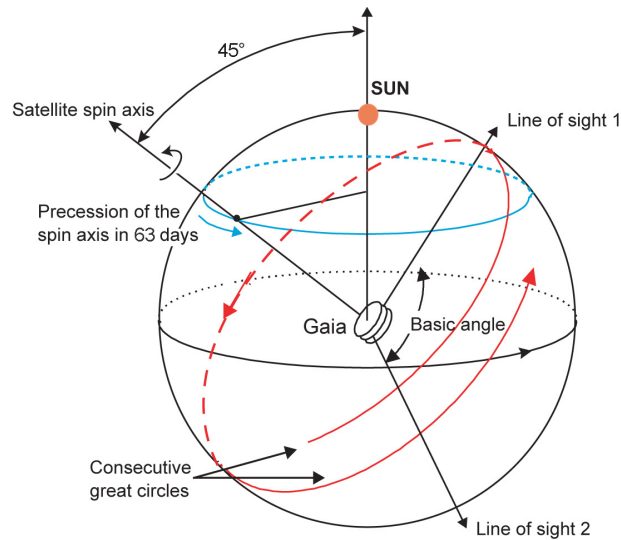
1.1.3 Επιχειρησιακή φάση του δορυφόρου Gaia

Ο δορυφόρος Gaia θα ανιχνεύσει τον ουρανό περίξ του σημείου Lagrange L2, στον άξονα Γης - Ήλιου και στην αντίθετη κατεύθυνση από εκείνη του Ήλιου, σε απόσταση περίπου 1.5 εκατομμυρίων χιλιομέτρων από τη Γη. Η συγκεκριμένη περιοχή αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή για τη συγκεκριμένη αποστολή σε όρους επικοινωνιών, χειρισμού, κόστους, περιβάλλοντος και προσβασιμότητας. Σε αυτήν οι θερμικές συνθήκες είναι ιδιαιτέρως σταθερές, γεγονός που αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχία της διαστημικής αποστολής, με δεδομένη την ευαισθησία των κατόπτρων του δορυφόρου ακόμα και σε μεταβολές θερμοκρασίας του ενός χιλιοστού του βαθμού εντός μερικών ωρών.

Κατά την επιχειρησιακή φάση του δορυφόρου Gaia σε τροχιά γύρω από το σημείο L2, θα πραγματοποιείται οκτάωρη καθημερινή ροή επιστημονικών δεδομένων, εβδομαδιαία ανανέωση του εν χρήση νόμου σάρωσης του ουρανού (scanning law) και μηνιαίες εργασίες συντήρησης σε τροχιά.



Σχήμα 1.2: Η απογείωση του οχήματος εκτόξευσης Soyuz από το διαστημικό κέντρο της γαλλικής Γουιάνα στις 21 Οκτωβρίου 2011, με φορτίο τους δύο πρώτους δορυφόρους Galileo. Copyright: ESA/CNES/ARIANESPACE - S. Corvaja, 2011.



Σχήμα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση του νόμου σάρωσης του ουρανού που πρόκειται να χρησιμοποιήσει ο δορυφόρος Gaia. Copyright: Jos de Bruijne / ESA.

Οι παρατηρήσεις θα πραγματοποιούνται από τα δύο τηλεσκόπια οι κατευθύνσεις των οποίων σχηματίζουν γωνία 106.5° . Ο δορυφόρος θα περιστρέφεται με ρυθμό 1° ανά λεπτό, κάνοντας μία πλήρη περιστροφή σε έξι ώρες. Κάθε ουράνιο σώμα που θα ανιχνεύεται από το ένα τηλεσκόπιο, θα ανιχνεύεται και από το δεύτερο μετά από 106.5 λεπτά. Ο άξονας περιστροφής του δορυφόρου θα σχηματίζει γωνία 45° ανά λεπτό με την κατεύθυνση του Ήλιου και θα πραγματοποιεί μετάπτωση με μία μέση περίοδο περίπου 63 ημερών. Ο ανωτέρω νόμος σάρωσης του ουρανού αναπαρίσταται σχηματικά στο σχήμα 1.3.

1.1.4 Διαστημικό σκάφος

Ο δορυφόρος Γαία αποτελείται από τρεις κύριες λειτουργικές μονάδες: Τη μονάδα ωφέλιμου φορτίου (payload module), τη μηχανολογική μονάδα (mechanical service module) και την ηλεκτρολογική μονάδα (electrical service module). Η περιγραφή των μονάδων αυτών βρίσκεται στα παρακάτω:

Μονάδα ωφέλιμου φορτίου

Η μονάδα ωφέλιμου φορτίου περιέχει το οπτικό όργανο και όλες τις ηλεκτρονικές συσκευές που απαιτούνται για τη διαχείριση της λειτουργίας του και

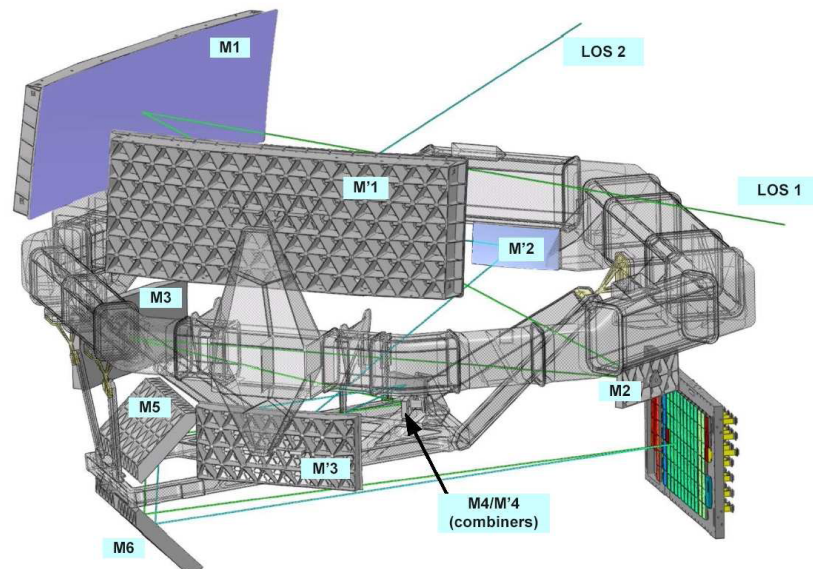
την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων (raw data) που θα συλλέξει ο δορυφόρος Gaia. Η συγκεκριμένη μονάδα αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο όργανο το οποίο εκτελεί τρεις βασικές λειτουργίες, την Αστρομετρική λειτουργία, τη Φωτομετρική λειτουργία και τη Φασματοσκοπική λειτουργία.

Πιο αναλυτικά, η μονάδα ωφέλιμου φορτίου αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- (α) Τοροειδής διάφθρωση / έδρα οπτικών (Torus structure / optical bench)
- (β) Δύο τηλεσκόπια των τριών κατόπτρων το καθένα
- (γ) Πτυσσόμενα οπτικά (σύνολο τεσσάρων κατόπτρων)
- (δ) Οπτο-μηχανική συνδεσμολογία φασματογράφου ακτινικών ταχυτήτων (Radial Velocity Spectrometer - RVS)
- (ε) Πρίσμα μπλε φωτομέτρου (Blue Photometer - BP)
- (στ) Πρίσμα κόκκινου φωτομέτρου (Red Photometer - RP)
- (ζ) Συνδεσμολογία εστιακού επιπέδου και συναφής ηλεκτρονικός εξοπλισμός
- (η) Συσκευές επεξεργασίας βίντεο
- (θ) Συσκευή χειρισμού μονάδας ωφέλιμου φορτίου και και συναφές λογισμικό
- (ι) Δίποδα και μηχανισμοί αποδέσμευσης
- (ια) Μηχανισμοί κίνησης δευτερεύοντος κατόπτρου και συναφής ηλεκτρονικός εξοπλισμός
- (ιβ) Οπτο-μηχανικές συνδεσμολογίες ελέγχου βασικής γωνίας (Basic Angle Monitoring - BAM) των δύο τηλεσκοπίων
- (ιγ) Οπτο-μηχανικές συνδεσμολογίες αισθητήρα μετώπου κύματος (Wave Front Sensor - WFS)
- (ιδ) Οπτικές πηγές και ηλεκτρονικά για τις συσκευές BAM και WFS
- (ιε) Ωρολογιακός μηχανισμός συγχρονισμού (Clock Distribution Unit)

Ο δορυφόρος Gaia περιέχει δύο πανομοιότυπα τηλεσκόπια όπου το καθένα περιλαμβάνει έξι κάτοπτρα (M1-M6), εκ των οποίων τα δύο είναι κοινά (M5 και M6). Τα τηλεσκόπια έχουν εστιακό μήκος 35 μέτρων και οι κατευθύνσεις τους θα σχηματίζουν γωνία 106.5° (βασική γωνία). Το πρωτεύον κάτοπτρο κάθε τηλεσκοπίου (M1) είναι μία κοίλη επιφάνεια διαστάσεων $1.49m \times 0.54m$. Η έδρα των οπτικών και το σύστημα των κατόπτρων αναπαρίστανται στο σχήμα 1.4.

Το εστιακό επίπεδο του δορυφόρου Gaia (εικόνες 1.5 και 1.6), το οποίο είναι κοινό και για τα δύο τηλεσκόπια, θα είναι το μεγαλύτερο που έχει κατασκευαστεί ποτέ για διαστημική χρήση, με το σύνολο των pixels του να αγγίζει το ένα δισεκατομμύριο. Το εστιακό επίπεδο αποτελείται από τα παρακάτω πέντε τμήματα:



Σχήμα 1.4: Σχηματική αναπαράσταση της έδρας των οπτικών, του συστήματος των κατόπτρων (M1/M'1-M6) και του εστιακού επιπέδου (κάτω δεξιά). Copyright: EADS Astrium.

(α) Αισθητήρας μετώπου κύματος (WFS) και ελεγκτής βασικής γωνίας (BAM). Τα δύο CCDs του αισθητήρα WFS θα χρησιμοποιηθούν στη μέτρηση της ποιότητας των οπτικών του κάθε τηλεσκοπίου, ενώ τα δύο CCDs του ελεγκτή BAM θα χρησιμοποιηθούν στην παρακολούθηση των διακυμάνσεων της βασικής γωνίας.

(β) Ανιχνευτής Sky Mapper (ASM). Ο ανιχνευτής Sky Mapper των 14 CCDs θα παράσχει πληροφορίες σχετικές με τις διελεύσεις των αντικειμένων που θα ανιχνεύει ο δορυφόρος Gaia στα CCDs.

(γ) Αστρομετρικό πεδίο (Astrometric Field). Το συγκεκριμένο τμήμα των 62 CCDs θα πραγματοποιήσει τις αστρομετρικές παρατηρήσεις.

(δ) Μπλε (BP) και κόκκινο (RP) φωτόμετρο. Τα δύο φωτόμετρα των 14 CCDs θα πραγματοποιήσουν τις φωτομετρικές παρατηρήσεις χαμηλής ανάλυσης των αντικειμένων που πρόκειται να ανιχνευθούν από τον δορυφόρο Gaia.

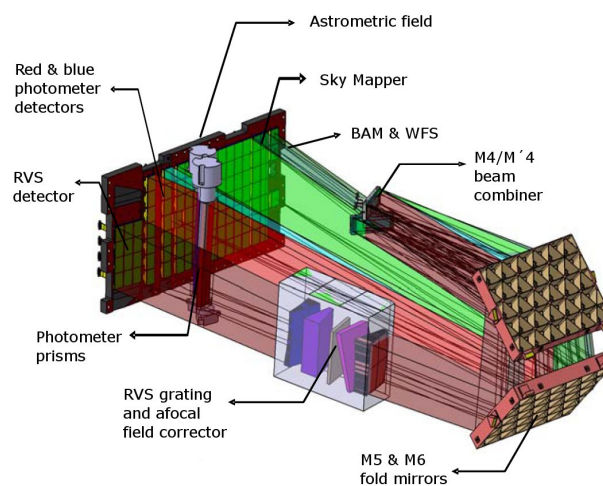
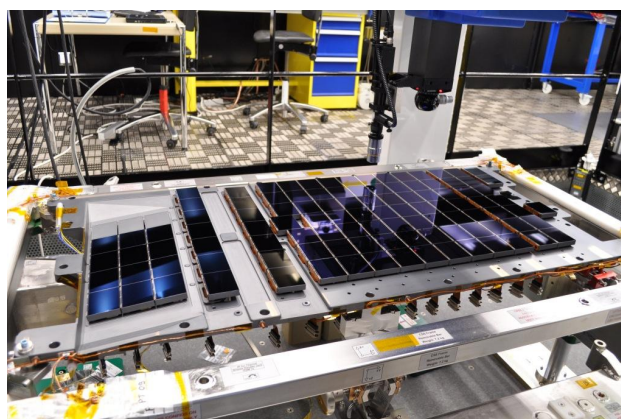
(ε) Φασματογράφος ακτινικών ταχυτήτων (RVS). Ο φασματογράφος RVS των 12 CCDs θα πραγματοποιήσει τις φασματοσκοπικές παρατηρήσεις των λαμπρών αντικειμένων που πρόκειται να ανιχνευθούν από τον δορυφόρο Gaia.

Έτσι, η συστοιχία των CCDs του εστιακού επιπέδου του δορυφόρου Gaia θα περιλαμβάνει 1×3 CCDs των δύο ελεγκτών BAM και του αισθητήρα WFS, 2×7 CCDs του ανιχνευτή Sky Mapper, 8×7 και 1×6 CCDs του αστρομετρικού πεδίου AF, 1 CCD του αισθητήρα WFS, 1×7 CCDs του φωτόμετρου BP, 1×7 CCDs του φωτόμετρου RP και 3×4 CCDs του φασματογράφου RVS.

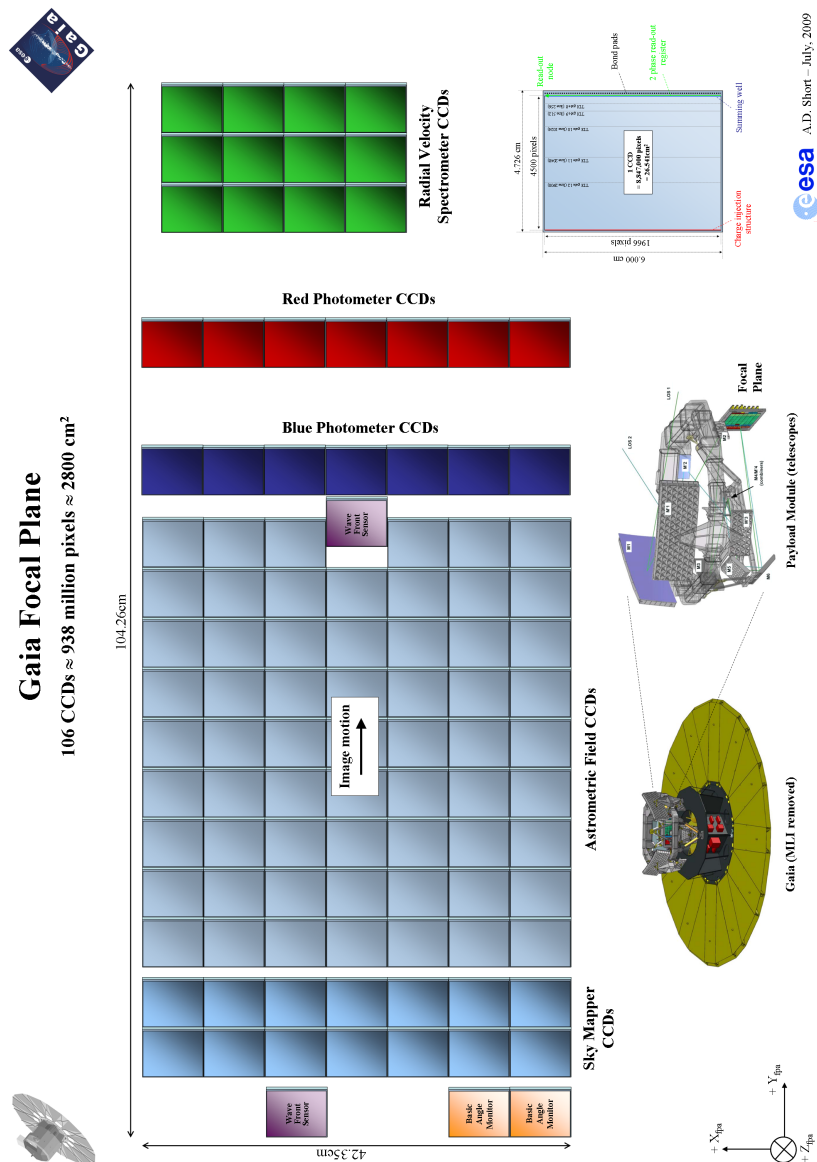
Μηχανολογική και ηλεκτρολογική μονάδα

Η μηχανολογική μονάδα (σχήμα 1.7) είναι σχεδιασμένη ώστε να εξασφαλίσει τη σταθερότητα της βασικής γωνίας, κάτι που είναι απαραίτητο ώστε η διαστημική αποστολή Gaia να εκπληρώσει τους επιστημονικούς της στόχους. Περιλαμβάνει όλα τα μηχανικά, δομικά και θερμικά στοιχεία που υποστηρίζουν τα οπτικά όργανα και τα ηλεκτρονικά του διαστημικού σκάφους. Σε αυτά περιλαμβάνονται το αλεξήλιο (Deployable sunshield), που προστατεύει το σκάφος από την ηλιακή ακτινοβολία, η θερμική σκηνή (thermal tent), η οποία παρέχει επιπρόσθετη προστασία των επιστημονικών οργάνων, οι προωστικοί κινητήρες (thrusters) του συστήματος χημικής πρόωσης, το σύστημα μικρο-πρόωσης (micro-propulsion system), οι ηλιακές συστοιχίες και η εξάρτυση (harness).

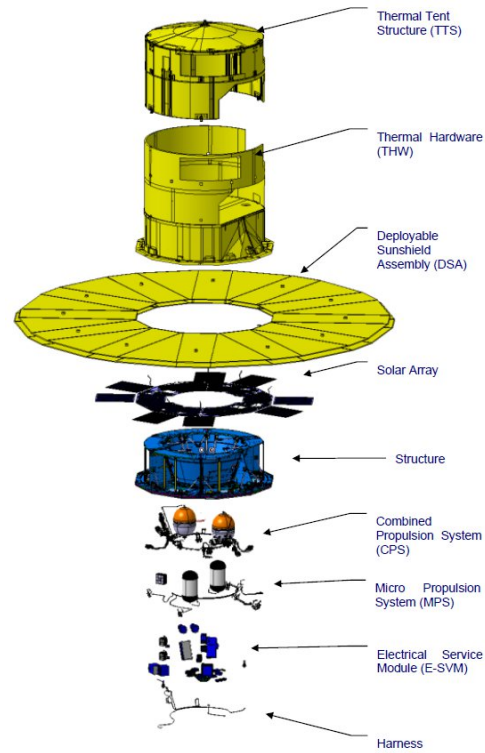
Το αλεξήλιο φαίνεται σε πλήρη ανάπτυξη στο σχήμα 1.7. Καθώς είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε συνθήκες μικροβαρύτητας, είναι αδύνατον να συγκρατήσει το βάρος του στην επιφάνεια της Γης. Για την αποτροπή λοιπόν κάποιας βλάβης και για τις ανάγκες των απαραίτητων δοκιμών και συναρμολογήσεων, το αλεξήλιο συνδέεται με ένα υποστηρικτικό σύστημα από καλώδια και αντίβαρα.



Σχήμα 1.5: Πάνω: Το πλήρες σύνολο των 106 CCDs που απαρτίζουν το εστιακό επίπεδο του δορυφόρου Gaia. Κάτω: Σχηματική αναπαράσταση του εστιακού επιπέδου. Copyright: EADS Astrium.



Σχήμα 1.6: Σχηματική αναπαράσταση της συστοιχίας των CCDs του εστιακού επιπέδου του δορυφόρου Gaia. Copyright: Alexander Short - ESA.



Σχήμα 1.7: Πάνω: Η διαρθρωτική δομή της μηχανολογικής και της ηλεκτρολογικής μονάδας του δορυφόρου Gaia. Κάτω: Το αλεξήλιο του δορυφόρου Gaia σε πλήρη ανάπτυξη. Copyright: Astrium France

Η ηλεκτρολογική μονάδα (σχήμα 1.7) υποστηρίζει το ωφέλιμο φορτίο και το διαστημικό σκάφος στον έλεγχο και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, στην κεντρική διαχείριση των δεδομένων, καθώς και στη ραδιοεπικοινωνία με τους επίγειους σταθμούς ελέγχου του δορυφόρου Gaia, εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη τηλεμετρία υψηλού ρυθμού μετάδοσης.

1.1.5 Φωτόμετρα BP/RP και φασματογράφος RVS

Κεντρική θέση στα παραδοτέα που ο δορυφόρος Gaia πρόκειται να παραδώσει θα είναι η φωτομετρία και η φασματοσκοπία των αντικειμένων που θα ανιχνεύσει, ανάλογα με το μέγεθός τους. Η παρούσα διατριβή εντάσσεται στο γενικότερο πλαίσιο της προετοιμασίας συνθετικών και ημι-εμπειρικών φασμάτων γαλαξιών για τις ανάγκες ταξινόμησης και παραμετροποίησης των φασμάτων γαλαξιών που πρόκειται να παρατηρήσει ο δορυφόρος Gaia. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των φωτομέτρων και του φασματογράφου του δορυφόρου Gaia.

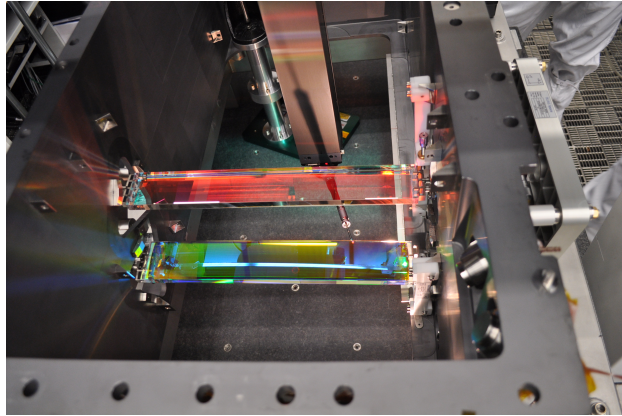
Φωτόμετρα BP/RP

Τα φωτόμετρα του δορυφόρου Gaia (εικόνες 1.5, 1.6 και 1.8) έχουν δύο κύριους στόχους: (α) τον υπολογισμό λαμπροτήτων, ενεργών θερμοκρασιών, μαζών, ηλικιών, χημικών συνθέσεων και άλλων παραμέτρων αστροφυσικών αντικειμένων μεγέθους έως και $G \sim 20$ (οι πιο αμυδροί), και (β) την επικουρία στην εξασφάλιση της ακρίβειας των αστρομετρικών μετρήσεων μέσω των διορθώσεων των χρωματικών σφαλμάτων που προκαλεί το οπτικό σύστημα. Η συγκεκριμένη διόρθωση είναι δυνατή μόνο μέσω της μελέτης του φασμάτων των παρατηρηθέντων αντικειμένων.

Τα δύο φωτόμετρα, το μπλε (BP) και το κόκκινο (RP), χρησιμοποιούν πρίσμα χωρίς σχισμή (slitless prism) και καλύπτουν μία περιοχή μηκών κύματος εύρους 670 nm, από τα 330 nm έως τα 1000 nm (Jordi et al., 2010). Πιο συγκεκριμένα, το φωτόμετρο BP ανιχνεύει στα εύρη μηκών κύματος 330-680 nm, ενώ το φωτόμετρο RP στα 640-1000 nm. Τα φωτόμετρα χρησιμοποιούν 14 κάμερες CCD (7 το καθένα). Η φασματική ανάλυση μεταβάλλεται με το μήκος κύματος, με τη διασπορά να είναι υψηλότερη στα μικρά μήκη κύματος. Στο φωτόμετρο BP η φασματική ανάλυση μεταβάλλεται από τα 4 έως τα 32 $nm \cdot pixel^{-1}$, ενώ στο φωτόμετρο RP μεταβάλλεται από τα 7 έως τα 15 $nm \cdot pixel^{-1}$.

Φασματογράφος RVS

Ο κύριος στόχος του φασματογράφου ακτινικών ταχυτήτων του δορυφόρου Gaia (εικόνες 1.5 και 1.6) είναι η μέτρηση ακτινικών ταχυτήτων, ταχυτήτων περιστροφής, ατμοσφαιρικών παραμέτρων και αφθονιών αστροφυσικών αντικειμένων μεγέθους έως και $G \sim 17$ (οι πιο αμυδροί). Οι μετρήσεις αυτές, σε συνδυασμό με εκείνες των υπολοίπων οργάνων του δορυφόρου Gaia, θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της δυναμικής κατάστασης και του ιστορικού δημιουργίας του Γαλαξία μας, όπως επίσης και για την ηλικία, την εσωτερική δομή και την εξέλιξη άστρων όλων των φασματικών τύπων (Wilkinson et al., 2005).



Σχήμα 1.8: Πάνω: Τα πρίσματα του μπλε (BP) και του κόκκινου (RP) φωτομέτρου. Copyright: EADS Astrium.

Ο φασματογράφος RVS καλύπτει μία περιοχή μηκών κύματος εύρους 27 nm, από τα 847 nm έως τα 874 nm, στη φασματική περιοχή του Εγγύς Υπερύθρου (Near Infrared). Χαρακτηρίζεται από υψηλή ονομαστική ανάλυση $R = 11500$ και διασπορά περίπου ίση με $0.75 \text{ \AA}$ ανά pixel. Χρησιμοποιεί 12 κάμερες CCD και παρέχει ένα οπτικό πεδίο περίπου ίσο με $0.22 \times 0.39 \text{ deg}^2$. Κατά την πενταετή λειτουργία του θα συλλέξει περίπου 40 φάσματα για κάθε μία πηγή που πρόκειται να παρατηρήσει.

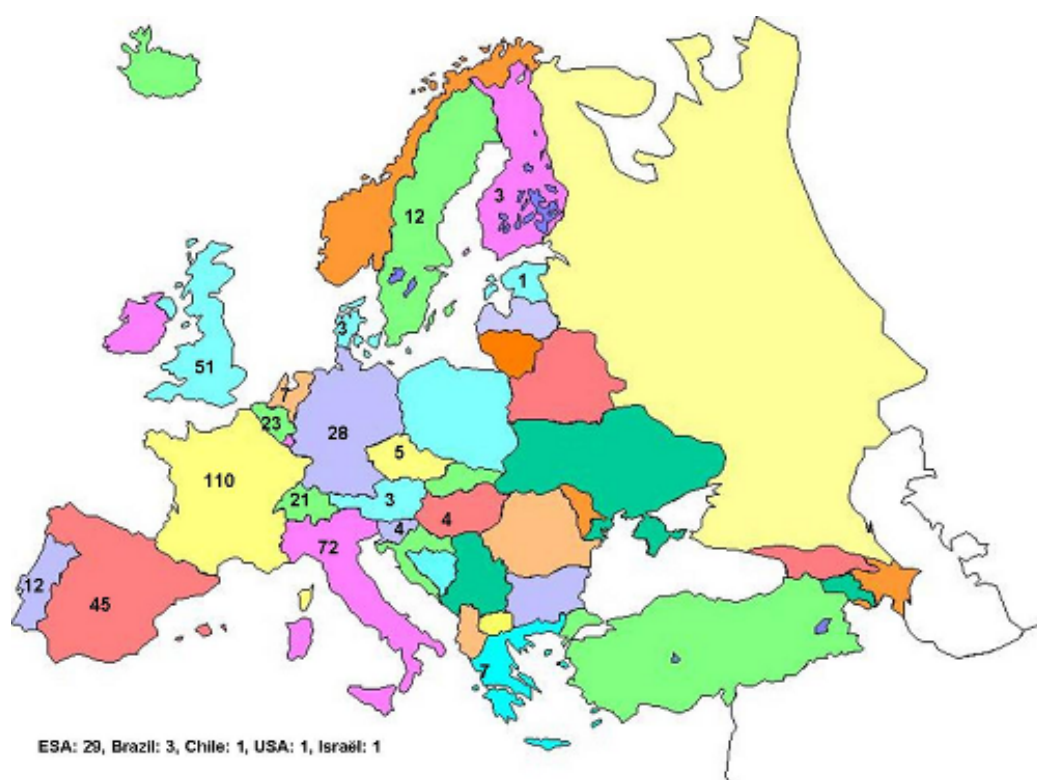
Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της φασματικής περιοχής λειτουργίας του φασματογράφου RVS είναι η τριπλέτα του ασβεστίου Ca II (κυρίως στους ψυχρούς αστέρες), οι γραμμές Paschen P16, P15, P14 και P13 του υδρογόνου (κυρίως στους θερμούς αστέρες), οι γραμμές Fe, Si, Mg, He I, He II και N I, καθώς και η διάχυτη μεσοαστρική ζώνη (Diffuse Interstellar Band) στα $8620 \text{ \AA}$, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μεσοαστρικής απορρόφησης. Στην περίπτωση χαμηλής ή μέσης φασματικής ανάλυσης, οι γραμμές Paschen P16 ($8502.5 \text{ \AA}$), P15 ($8545.4 \text{ \AA}$) και P13 ($8665.0 \text{ \AA}$) αλληλεπικαλύπτονται με τις γραμμές της τριπλέτας ασβεστίου Ca1 ($8498.02 \text{ \AA}$), Ca2 ($8542.09 \text{ \AA}$) και Ca3 ($8662.14 \text{ \AA}$).

1.1.6 Κοινοπραξία DPAC

Για τις ανάγκες της προετοιμασίας της διαστημικής αποστολής Gaia έχει συγκροτηθεί η Κοινοπραξία Επεξεργασίας και Ανάλυσης Δεδομένων DPAC (Data Processing and Analysis Consortium). Πρόκειται για μία κοινότητα που αποτελείται από περισσότερους από 400 επιστήμονες και μηχανικούς λογισμικού (446 έως τον Ιανουάριο του 2012). Η κατανομή των προαναφερθέντων μελών της κοινοπραξίας DPAC ανά κράτος παρουσιάζεται στο σχήμα 1.9 (http://www.rssd.esa.int/index.php?project=GAIA&page=DPAC_Membership).

Η κοινοπραξία DPAC είναι υπεύθυνη για (α) την προετοιμασία αλγορίθμων κατάλληλων να αναλύσουν τα αστρομετρικά, φωτομετρικά και φασματοσκοπικά δεδομένα που θα συλλέξει ο δορυφόρος Gaia, (β) την παραγωγή προσομοιωμένων δεδομένων που είναι απαραίτητα για το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τον έλεγχο του συστήματος επεξεργασίας των δεδομένων που θα ανακτήσει ο δορυφόρος Gaia, (γ) τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη, την προμήθεια και τη λειτουργία του υλικολογισμικού που είναι απαραίτητο για την επεξεργασία των προσομοιωμένων δεδομένων, των δεδομένων που θα συλλέξει ο δορυφόρος Gaia και τη δημιουργία του τελικού καταλόγου της διαστημικής αποστολής, και (δ) τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τον χειρισμό της βάσης δεδομένων του δορυφόρου Gaia.

Η κοινοπραξία DPAC αποτελείται από ένα σύνολο επιμέρους συντονιστικών μονάδων (Coordination Units - CU), κάθε μία από τις οποίες είναι επιφορτισμένη με μία βασική πτυχή της επεξεργασίας δεδομένων. Επιπλέον, κάθε συντονιστική μονάδα απαρτίζεται από πακέτα εργασίας (Work Packages - WP), ερευνητικές ομάδες υπεύθυνες για εξειδικευμένες δράσεις στα πλαίσια της συντονιστικής ομάδας στην οποία ανήκουν. Οι συντονιστικές μονάδες καταγράφονται στον πίνακα 1.1. Σημειώνεται ότι η μονάδα CU9 θα ενεργοποιηθεί στο μέλλον. Η παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του πακέτου εργασίας GWP-S-832 (Unresolved Galaxy Classifier - UGC), το οποίο εντάσσεται στη συντονιστική μονάδα CU8 (Astrophysical Parameters). Η μονάδα CU8 είναι επιφορτισμένη με την ταξινόμηση και την εκτίμηση αστροφυσικών παραμέτρων των αντικειμένων που θα ανιχνεύσει ο δορυφόρος Gaia, την αναγνώριση διπλών αστέρων και τον προσδιορισμό νέων/σπάνιων αντικειμένων. Η κοινοπραξία DPAC αποτελείται επίσης από έξι κέντρα επεξεργασίας δεδομένων (Data Processing Centers - DPC), τα οποία καταγράφονται στον πίνακα 1.2.



Σχήμα 1.9: Ο χάρτης της κατανομής των ανθρώπινων πόρων της κοινοπραξίας DPAC ανά κράτος (Ιανουάριος 2012).

Πίνακας 1.1: Οι συντονιστικές μονάδες της κοινοπραξίας DPAC.

Συντονιστική μονάδα	Αντικείμενο μελέτης
CU1	System Architecture
CU2	Data Simulations
CU3	Core Processing
CU4	Object Processing
CU5	Photometric Processing
CU6	Spectroscopic Processing
CU7	Variability Processing
CU8	Astrophysical Parameters
CU9	Catalogue Access

Πίνακας 1.2: Τα κέντρα επεξεργασίας δεδομένων της κοινοπραξίας DPAC.

Κέντρο	Τοποθεσία
DPCB	Barcelona, Spain
DPCC	Toulouse, France
DPCE	Madrid, Spain
DPCG	Geneva, Switzerland
DPCI	Cambridge, England
DPCT	Torino, Italy

1.2 Σύστημα UGC

Στη συνέχεια περιγράφεται το σύστημα της ταξινόμησης και παραμετροποίησης γαλαξιακών φασμάτων UGC (Unresolved Galaxy Classifier) τόσο ως πακέτο εργασίας στα πλαίσια της κοινοπραξίας DPAC, όσο και ως παραδοτέο λογισμικό το οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί κατά την πενταετή διαστημική αποστολή του δορυφόρου Gaia.

1.2.1 Πακέτο εργασίας GWP-S-832

Το αντικείμενο του πακέτου εργασίας GWP-S-832 με τίτλο Unresolved Galaxy Classifier είναι αφενός η μελέτη, η ανάπτυξη και ο έλεγχος αλγορίθμων, οι οποίοι θα είναι ικανοί να εκτιμήσουν με βέλτιστο τρόπο κάποιες αστροφυσικές παραμέτρους των γαλαξιών που πρόκειται να ανιχνεύσει ο δορυφόρος Gaia, και αφετέρου να δημιουργήσει και να παραδώσει εκείνα τα συνθετικά δεδομένα που απαιτούνται για την αναγνώριση και την ταξινόμηση των γαλαξιών αυτών (Kontizas et al., 2011).

Τα καθήκοντα που σχετίζονται με το αντικείμενο του πακέτου εργασίας UGC είναι τα εξής:

1. Βιβλιοθήκες φασμάτων γαλαξιών: (α) Βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στην ανάλυση των φωτομέτρων BP/RP, (β) βιβλιοθήκη ημι-εμπειρικών φασμάτων γαλαξιών στην ανάλυση των φωτομέτρων BP/RP, (γ) βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στην ανάλυση του φασματογράφου RVS, και (δ) διερεύνηση των σημαντικότερων αστροφυσικών παραμέτρων για την κατασκευή των προαναφερθέντων φασμάτων γαλαξιών.

2. Κατασκευή σχετικού συστήματος ταξινόμησης και παραμετροποίησης (UGC)

3. Ταξινόμηση - παραμετροποίηση: (α) Εύρεση βέλτιστων δεικτών χρώματος και ευρυζωνικών φασματικών χαρακτηριστικών για τις ανάγκες ταξινόμησης και παραμετροποίησης γαλαξιακών φασμάτων, (β) εκτεταμένες δοκιμασίες κατάλληλων λογισμικών ταξινόμησης και σχετικές στατιστικές δοκιμασίες, (γ) εύρεση προσδιοριστέων βασικών παραμέτρων γαλαξιών, και (δ) Ταξινόμηση εκτεταμένων εξωγαλαξιακών αντικειμένων αναφορικά με τη χωρική συμπεριφορά των φασματικών τους χαρακτηριστικών

4. Εκτεταμένα εξωγαλαξιακά αντικείμενα

5. Επαλήθευση και επικύρωση των δεδομένων των αλγορίθμων τόσο στη φάση των δοκιμών, όσο και κατά την επιχειρησιακή φάση του δορυφόρου Gaia

6. Τροποποίηση και βελτιστοποίηση των αλγορίθμων κατά την επιχειρησιακή φάση του δορυφόρου Gaia, με βάση τα πραγματικά δεδομένα

7. Συμμετοχή στην κατασκευή του τελικού καταλόγου της διαστημικής αποστολής Gaia με τη χρήση των αποτελεσμάτων του σχετικού λογισμικού

Τα παραδοτέα που σχετίζονται με το αντικείμενο του πακέτου εργασίας UGC είναι τα εξής:

1. Βιβλιοθήκες φασμάτων γαλαξιών στην ανάλυση των φωτομέτρων BP/RP
2. Βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στην ανάλυση του φασματογράφου RVS
3. Διερεύνηση των σημαντικότερων φασματικών χαρακτηριστικών στο εύρος μηκών κύματος του δορυφόρου Gaia για ρεαλιστικές τιμές ερυθρομετατόπισης
4. Λογισμικό ταξινόμησης και παραμετροποίησης φασμάτων γαλαξιών.

1.2.2 Λογισμικό UGC

Το λογισμικό με τίτλο Unresolved Galaxy Classifier αναπτύσσεται σε γλώσσα προγραμματισμού Java και προορίζεται να ταξινομήσει και να παραμετροποιήσει τα φάσματα γαλαξιών που πρόκειται να ανιχνεύσουν τα φωτόμετρα BP/RP του δορυφόρου Gaia (Bellas-Velidis et al., 2010, 2012). Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα UGC θα κληθεί να αποδόσει σε κάθε παρατηρούμενο γαλαξία την πιθανότητα να ανήκει σε κάθε φασματικό τύπο και να προβλέψει τις τιμές αστροφυσικών παραμέτρων σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις. Οι εκτιμητέες παράμετροι είναι εκείνες που σχετίζονται με τον ρυθμό αστρικής δημιουργίας, καθώς και η ερυθρομετατόπιση και η απορρόφηση.

Για να επιτύχει το σύστημα UGC τους στόχους του, θα πρέπει πρώτα να έχει «εκπαιδευτεί» να ταξινομεί και να παραμετροποιεί προσομοιωμένα φάσματα γαλαξιών στη μορφή που θα τα παρατηρήσει ο δορυφόρος Gaia. Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση των αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης Support Vector Machines (SVM) και νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Networks - ANN). Οι παραπάνω μέθοδοι βασίζονται στην εκπαίδευση προτύπων, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι συνθετικά και ημι-εμπειρικά φάσματα γαλαξιών. Η παρούσα διδακτορική διατριβή περιέχει κατά κύριο λόγο τις διαδικασίες δημιουργίας και βελτιστοποίησης βιβλιοθηκών τέτοιων φασμάτων.

Το σύστημα UGC αποτελείται από δύο κύρια λειτουργικά τμήματα ταξινόμησης και παραμετροποίησης, το UGC_Learn και το UGC_Apply, τα οποία περιγράφονται παρακάτω:

UGC_Learn: Στο συγκεκριμένο τμήμα του λογισμικού (α)το σύστημα εκπαιδεύεται στην πρόβλεψη του φασματικού τύπου και των τιμών των αστροφυσικών παραμέτρων προσομοιωμένων φασμάτων γαλαξιών (δείγμα εκπαίδευσης). Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος τεχνητής νοημοσύνης SVM (πλέον χρησιμοποιούνται και νευρωνικά δίκτυα) ανάγει τους συσχετισμούς μεταξύ των προσομοιωμένων φασμάτων και των αντίστοιχων παραμέτρων τους σε έναν χώρο περισσότερων διαστάσεων, όπου κατασκευάζει ένα υπερεπίπεδο μέγισ-

του διαχωρισμού (maximal separating hyperplane) ανάμεσά τους, το μοντέλο - SVM, και (β) το μοντέλο - SVM εφαρμόζεται σε άλλα προσομοιωμένα φάσματα γαλαξιών (δείγμα δοκιμών και επαλήθευσης), προβλέποντας τον φασματικό τους τύπο και τις τιμές των αστροφυσικών παραμέτρων τους. Οι προβλεπόμενες τιμές συγκρίνονται με τις πραγματικές, ώστε να αξιολογηθεί το εκάστοτε μοντέλο και τελικά να επιλεγεί το αποδοτικότερο.

UGC_Apply: Στο συγκεκριμένο τμήμα του λογισμικού, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί κατά την επιχειρησιακή φάση της διαστημικής αποστολής, (α) κάθε παρατηρηθέν από τον δορυφόρο Gaia φάσμα γαλαξία αξιολογείται ως προς την ποιότητά του να αναλυθεί περαιτέρω, (β) στα κατάλληλα φάσματα εφαρμόζεται το μοντέλο - SVM στο οποίο έχει εκπαιδευτεί το σύστημα, και (γ) πραγματοποιείται πρόβλεψη του φασματικού τύπου και των αστροφυσικών παραμέτρων του φάσματος, τα οποία αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων του δορυφόρου Gaia (Gaia Main Database). Πρέπει να σημειωθεί ότι στο τμήμα UGC_Apply αποδίδεται σε κάθε υπό επεξεργασία φάσμα η πιθανότητα να ανήκει σε κάθε έναν φασματικό τύπο στους οποίους έχει εκπαιδευτεί το σύστημα, και στη συνέχεια εκτιμώνται για κάθε περίπτωση χωριστά οι αντίστοιχες αστροφυσικές παράμετροι.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη δημιουργία του μοντέλου - SVM, τα φάσματα εκπαιδεύονται ξεχωριστά για κάθε μέγεθος G και για διάφορα εύρη τιμών της ερυθρομετατόπισης και της απορρόφησης. Αυτό καθιστά πιο ακριβή τον υπολογισμό όλων των εκτιμητέων παραμέτρων. Σχετικά με τον υπολογισμό της απορρόφησης, υπάρχουν δύο εναλλακτικές μέθοδοι υπολογισμού, (α) η απόδοση στην τιμή της απορρόφησης του μέσου όρου της απορρόφησης των κοντινότερων αντικειμένων στον ανά πάσα στιγμή ανιχνευθέντα γαλαξία του δορυφόρου Gaia, και (β) ο υπολογισμός της τιμής της απορρόφησης κατ' ευθείαν από το μοντέλο - SVM. Οι μέχρι τώρα δοκιμές δείχνουν ότι η απορρόφηση υπολογίζεται με μεγάλη ακρίβεια ακόμα και με τη δεύτερη μέθοδο. Σε κάθε περίπτωση, η ύπαρξη δύο μεθόδων υπολογισμού της τιμής της απορρόφησης είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς θα καταστεί ευκολότερη η αξιολόγησή τους και το τελικό αποτέλεσμα θα είναι περισσότερο αξιόπιστο και με καλύτερα ορισμένο περιθώριο σφάλματος.

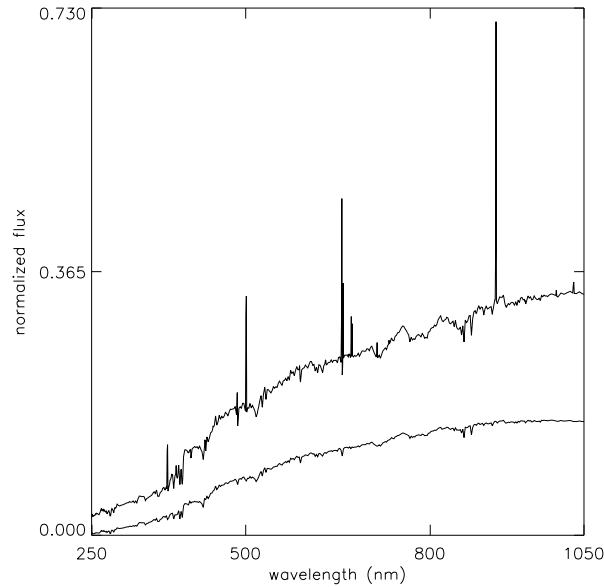
1.3 Το μοντέλο PÉGASE

Ο τομέας της αστροφυσικής που σχετίζεται με τη φασματική εξέλιξη γαλαξιών αναπτύσσεται συνεχώς, ακολουθώντας (α) τη δημιουργία ολοένα και πληρέστερων συνθετικών και εμπειρικών βιβλιοθηκών αστρικών φασμάτων, (β) την ολοένα και καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο εξελίσσονται οι αστέρες, και (γ) τη συσσώρευση εκατομμυρίων φασμάτων γαλαξιών από επίγεια και διαστημικά τηλεσκόπια. Ως αποτέλεσμα, σχεδιάζονται και κατασκευάζονται μοντέλα φασματικής εξέλιξης γαλαξιών, τα οποία χρησιμοποιούνται εκτενώς σε σχετικά ερευνητικά προγράμματα. Μεταξύ αυτών ξεχωρίζουν το μοντέλο *Projet d'Étude des GALaxies par Synthèse Évolutive - PÉGASE* (Fioc and Rocca-Volmerange, 1997, 1999; Le Borgne and Rocca-Volmerange, 2002; Bruzual A., 2009)) και τα μοντέλα των Bruzual A. and Charlot (1993).

Το PÉGASE είναι ένα μοντέλο φασματικής εξέλιξης γαλαξιών, γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και δημοσίως διαθέσιμο (<http://www.iap.fr/pegase>), το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί σε εκατοντάδες δημοσιευμένες εργασίες σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά. Το μοντέλο PÉGASE αποτελεί μία πλήρη και κατανοητή περιγραφή της φασματικής εξέλιξης των γαλαξιών, όπου καλύπτονται όλες οι φάσεις της αστρικής εξέλιξης.

Πιο συγκεκριμένα, το παραπάνω λογισμικό χρησιμοποιεί τα μοντέλα αστρικής εξέλιξης της Πάντοβα (Bressan et al., 1993), στα οποία έχουν συμπεριληφθεί οι εξελικτικές φάσεις AGB (asymptotic giant branch) και post-AGB (Groenewegen and de Jong, 1993), καθώς και τη βιβλιοθήκη φασμάτων αστερών BaSeL 2.2 (Lejeune et al., 1997, 1998), ώστε να δημιουργήσει συνθετικά φάσματα γαλαξιών. Κάθε ένα από τα φάσματα αυτά, τα οποία εκτείνονται από το υπεριώδες έως το εγγύς υπέρυθρο, αντιπροσωπεύει και ένα εξελικτικό σενάριο. Το σενάριο αυτό περιέχει τον νόμο που ακολουθεί ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας (Star Formation Rate - SFR) στον συγκεκριμένο γαλαξία, την αρχική συνάρτηση μάζας (Initial Mass Function - IMF) με την ελάχιστη και τη μέγιστη δυνατή αστρική μάζα, τη μεταλλικότητα του μεσοαστρικού υλικού κλπ. Στον Πίνακα 1.3 καταγράφονται οι κώδικες προγραμματισμού που απαρτίζουν το μοντέλο PÉGASE, καθώς και οι λειτουργίες που επιτελούν, ενώ στο σχήμα 1.10 παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο συνθετικά φάσματα γαλαξιών στο φασματικό εύρος $250\text{nm} - 1050\text{nm}$ τα οποία έχουν δημιουργηθεί με το μοντέλο. Το ένα εξ' αυτών αντιστοιχεί σε σπειροειδή γαλαξία, ενώ το άλλο σε γαλαξία προγενέστερου φασματικού τύπου.

Όπως έχει προαναφερθεί, η επιτυχής λειτουργία του συστήματος UGC απαιτεί την εκπαίδευση προτύπων φασμάτων γαλαξιών με γνωστές παραμέτρους. Η έλλειψη όμως βιβλιοθηκών ταξινομημένων και παραμετροποιημένων πραγματικών φασμάτων γαλαξιών, καθιστά τη χρήση συνθετικών φασμάτων



Σχήμα 1.10: Δύο ενδεικτικά συνθετικά φάσματα γαλαξιών του κώδικα PÉGASE, εκ των οποίων το ένα αντιστοιχεί σε σπειροειδή γαλαξία (πάνω) και το άλλο σε γαλαξία προγενέστερου φασματικού τύπου (κάτω).

Πίνακας 1.3: Οι κώδικες προγραμματισμού που απαρτίζουν το μοντέλο PÉGASE και οι λειτουργίες που επιτελούν.

Ονομασία κώδικα	Λειτουργία
SSPs.f	Υπολογισμός ιδιοτήτων απλών αστρικών πληθυσμών (Simple Stellar Populations - SSPs)
scenarios.f	Δημιουργία αρχείου με τα σενάρια αστρικής δημιουργίας για χρήση στον κώδικα spectra.f
spectra.f	Δημιουργία συνθετικών φασμάτων γαλαξιών και σχετικών ποσοτήτων
calib.f	Βαθμονόμηση χρωματικών φίλτρων
colors.f	Υπολογισμός χρωμάτων και άλλων ποσοτήτων

απαραίτητη. Το μοντέλο PÉGASE.2 παρέχει αυτή τη δυνατότητα δημιουργίας ταξινομημένων και παραμετροποιημένων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. Στην παρούσα διατριβή έχουν τύχει ανάλυσης και επεξεργασίας βιβλιοθήκες φασμάτων γαλαξιών, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί με τη χρήση της τελευταίας έκδοσης PÉGASE.2.

1.4 Βιβλιοθήκες γαλαξιακών φασμάτων για τη Gaia

Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή εκπαίδευση των μοντέλων του συστήματος UGC είναι η ύπαρξη ρεαλιστικών βιβλιοθηκών φασμάτων γαλαξιών. Στη συνέχεια περιγράφονται η βιβλιοθήκη συνθετικών (Tsalmantza et al., 2009) και η βιβλιοθήκη ημι-εμπειρικών (Tsalmantza et al., 2012) φασμάτων γαλαξιών. Στην παρούσα διατριβή, η πρώτη βελτιστοποιήθηκε, ενώ και στις δύο πραγματοποιήθηκαν δοκιμασίες ταξινόμησης και παραμετροποίησης.

1.4.1 Συνθετική βιβλιοθήκη

Η απαίτηση ύπαρξης ρεαλιστικών φασμάτων για την «εκπαίδευση» του συστήματος UGC οδήγησε στη δημιουργία της βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών (Tsalmantza et al., 2007, 2009). Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη (Tsalmantza et al., 2009) κατασκευάστηκε με το μοντέλο PEGASE.2 και περιέχει φάσματα που αντιστοιχούν σε τέσσερεις φασματικούς τύπους: γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου (Early-type galaxies), σπειροειδείς γαλαξίες, ανώμαλοι γαλαξίες και QSFG (Quenched Star Forming Galaxies). Τα φάσματα κάθε φασματικού τύπου κατασκευάστηκαν για συγκεκριμένες τιμές και όρια των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου PEGASE.2. Στο διάγραμμα δύο χρωμάτων $(g - r) - (r - i)$, τα χρώματα των παραπάνω φασμάτων καλύπτουν επιτυχώς τα αντίστοιχα χρώματα γαλαξιών παρατηρούμενων από το SDSS(2.40).

Στον πίνακα 1.4 καταγράφονται ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας και το εύρος των παραμέτρων του που αντιστοιχούν στα συνθετικά φάσματα γαλαξιών (Tsalmantza et al., 2009), και τα οποία διαμορφώνουν καθοριστικά τα φάσματα. Στο δεύτερο Κεφάλαιο της παρούσας διατριβής γίνεται μία εκτενής ανάλυση του τρόπου με τον οποίο οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν τη μορφή του τελικού φάσματος, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση της συγκεκριμένης συνθετικής βιβλιοθήκης.

Αρχικά κατασκευάστηκαν 28 885 συνθετικά φάσματα με μηδενική τιμή της ερυθρομετατόπισης z (redshift) και απορρόφηση (A_V) από τον Γαλαξία μας. Ο αριθμός των φασμάτων για κάθε φασματικό τύπο παρατίθεται στον Πίνακα 2.9. Με βάση τα φάσματα αυτά δημιουργήθηκαν νέα με τυχαίως επιλεγμένες τιμές της ερυθρομετατόπισης στο διάστημα 0.0 - 0.2, σε εκείνο το εύρος δηλαδή που ο δορυφόρος Gaia θα παρατηρήσει τους τυπικούς φασματικούς τύπους γαλαξιών. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν τέσσερα σετ φασμάτων με τιμές ερυθρομετατόπισης στα διαστήματα 0.00-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.15 και 0.15-0.20. Η τελική βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων γαλαξιών περιλαμβάνει 144 425 φάσματα, τα οποία προσομοιώθηκαν για τα φωτόμετρα BP/RP της αποσ-

Πίνακας 1.4: Ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας και το εύρος των παραμέτρων του για κάθε φασματικό τύπο γαλαξιών της συνθετικής βιβλιοθήκης. Οι παράμετροι p_1 και p_2 αντιστοιχούν στους εκάστοτε νόμους αστρικής δημιουργίας.

Γαλαξίες Προγενέστερου φασματικού τύπου	
SFR ($M_\odot/Myr$)	$\frac{p_2}{p_1} e^{-t/p_1}$
age (Gyr)	13
p_1 (Myr)	10 - 30 000
p_2 ($M_\odot$)	0.2 - 1.5
Σπειροειδείς γαλαξίες	
SFR ($M_\odot/Myr$)	$\frac{1}{p_2} [M_{gas}(t)]^{p_1}$
age (Gyr)	13
p_1	0.3 - 2.4
p_2 ($Myr/M_\odot$)	5 - 30 000
t_{infall} (Myr)	5 - 16 000
Ανώμαλοι γαλαξίες	
SFR ($M_\odot/Myr$)	$\frac{1}{p_2} [M_{gas}(t)]^{p_1}$
age (Gyr)	9
p_1	0.6 - 3.9
p_2 ($Myr/M_\odot$)	4 000 - 70 000
t_{infall} (Myr)	5 000 - 30 000
QSFG	
SFR ($M_\odot/Myr$)	$\frac{1}{p_2} [M_{gas}(t)]^{p_1}$, $t < 9-1000p_3$ Gyr 0, $t > 9-1000p_3$ Gyr
age (Gyr)	9
p_1	0.6 - 3.9
p_2 ($Myr/M_\odot$)	4 000 - 70 000
p_3 (Myr)	1 - 250
t_{infall} (Myr)	5 000 - 30 000

τολής Gaia ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το σύστημα UGC, αλλά και από το DPAC γενικότερα. Η προσομοίωση έγινε σε τρία μεγέθη ($G = 15$, $G = 18.5$, and $G = 20$), με την προσθήκη απορρόφησης στο εύρος 0.0-10.0 σύμφωνα με τον νόμο απορρόφησης του Fitzpatrick (1999), καθώς και με την προσθήκη θορύβου. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε μία σειρά από επιστημονικές δοκιμασίες πρόβλεψης του φασματικού τύπου, των αστροφυσικών παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας, της ερυθρομετατόπισης και της απορρόφησης, με τη χρήση του αλγόριθμου SVM (Tsalmantza et al., 2009).

1.4.2 Ημι-εμπειρική βιβλιοθήκη

Η ανάγκη για αξιολόγηση της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών (Tsalmantza et al., 2009) μέσω της σύγκρισης με πραγματικά φάσματα γαλαξιών, καθώς και η απαίτηση για τη διενέργεια επιστημονικών δοκιμών με όσο το δυνατό ρεαλιστικότερα προσομοιωμένα φάσματα γαλαξιών, οδήγησε στη δημιουργία της βιβλιοθήκης ημι-εμπειρικών φασμάτων γαλαξιών (Tsalmantza et al., 2012).

Τα ημι-εμπειρικά φάσματα γαλαξιών κατασκευάστηκαν συνδυάζοντας τα συνθετικά φάσματα γαλαξιών με παρατηρηθέντα φάσματα γαλαξιών του πέμπτου καταλόγου δεδομένων (Fifth Data Release - DR5) του SDSS (Adelman-McCarthy et al., 2007). Στα άκρα των χρησιμοποιηθέντων φασμάτων του SDSS προστέθηκαν τα αντίστοιχα τμήματα από εκείνα τα συνθετικά φάσματα, τα οποία βρέθηκαν να ομοιάζουν περισσότερο με τα πρώτα μέσω μίας σύγκρισης χ^2 . Αυτό κατέστη δυνατό λόγω του ότι το εύρος μηκών κύματος στο οποίο θα συλλέξει φάσματα ο δορυφόρος Gaia περιέχει το εύρος μηκών κύματος του SDSS.

Παρακάτω περιγράφεται περισσότερο αναλυτικά η δημιουργία των φασμάτων αυτών.

Δημιουργία βιβλιοθήκης

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία των φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια (Tsalmantza et al., 2012):

(1) **Επιλογή των κατάλληλων φασμάτων από τον κατάλογο του SDSS:** Επιλέγησαν φάσματα όσο το δυνατόν καλύτερης ποιότητας, με μικρά σφάλματα και με λόγο σήματος προς θόρυβο μεγαλύτερο του 16, καθώς και όσα φάσματα αντιστοιχούν σε γαλαξίες που δεν είναι ιδιαιτέρως εκτεταμένοι.

(2) **Εξασφάλιση συμβατότητας μεταξύ παρατηρηθέντων και συνθετικών φασμάτων:** Αφαιρέθηκε η επίδραση της ερυθρομετατόπισης στα φάσματα του SDSS μετατοπίζοντάς τα κατάλληλα στα μήκη κύματος και

διατηρώντας τη συνολική ροή αναλλοίωτη (k-correction), εξισώθηκε η ανάλυσή τους με εκείνη των συνθετικών φασμάτων (rebinning) και κανονικοποιήθηκαν όλα τα φάσματα στη μέση ροή της φασματικής περιοχής μεταξύ των 549 nm και των 551 nm (normalization).

(3) Σύγκριση μεταξύ παρατηρηθέντων και συνθετικών φασμάτων: Πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ κάθε φάσματος του καταλόγου SDSS με όλα τα συνθετικά φάσματα, με τη χρήση της προσαρμογής χ^2 (χ^2 -fitting). Από τη σύγκριση εξαιρέθηκαν τα άκρα των συνθετικών φασμάτων, καθώς και οι φασματικές περιοχές 3700 - 3800 Å, 4800 - 5100 Å και 6500 - 6800 Å, στις οποίες βρίσκονται οι ισχυρότερες γραμμές εκπομπής. Έτσι, για κάθε φάσμα του καταλόγου SDSS βρέθηκε το συνθετικό φάσμα που του ομοιάζει περισσότερο.

(4) Φασματική επέκταση των φασμάτων του καταλόγου SDSS: Στα άκρα κάθε αρχικού φάσματος του SDSS, δηλαδή στα ερυθρομετατοπισμένα, μη κανονικοποιημένα παρατηρηθέντα φάσματα, προστέθηκαν τα αντίστοιχα άκρα του περισσότερο όμοιου συνθετικού φάσματος, όπως προέκυψε από τη σύγκριση χ^2 . Στα συνθετικά φάσματα προστέθηκε ερυθρομετατόπιση και προσαρμόστηκε καταλλήλως η ανάλυση και η ροή τους. Τα τελικά φάσματα γαλαξιών είναι τα ημι-εμπειρικά φάσματα γαλαξιών.

Από τα 552 156 φάσματα γαλαξιών του καταλόγου DR5 του SDSS, επελέγησαν σύμφωνα με τα παραπάνω 33 670 φάσματα, η κατάλληλη επεξεργασία των οποίων και η σύγκρισή τους με τα 28 885 συνθετικά φάσματα γαλαξιών, οδήγησαν στη δημιουργία 33 670 ημι-εμπειρικών φασμάτων γαλαξιών, το κεντρικό τμήμα των οποίων αντιστοιχεί σε πραγματικά φάσματα του SDSS, ενώ τα ακραία τμήματα σε συνθετικά φάσματα. Σε κάθε φάσμα γαλαξία της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης αποδόθηκε ο φασματικός τύπος και όλοι οι παράμετροι του αντίστοιχου συνθετικού φάσματος.

Τα φάσματα της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης είναι ερυθρομετατοπισμένα και ερυθρωμένα και περιέχουν θόρυβο, αν και ο τελευταίος παράγοντας αβεβαιότητας έχει σχεδόν εξαλειφθεί επιλέγοντας φάσματα του καταλόγου SDSS με πολύ χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio - SNR). Η ύπαρξη όμως των παραπάνω παραγόντων αβεβαιότητας μας επιτρέπει να δοκιμάσουμε το λογισμικό ταξινόμησης και παραμετροποίησης των φασμάτων γαλαξιών σε πιο ρεαλιστικές και απαιτητικές καταστάσεις.

1.5 Εξόρυξη δεδομένων και μηχανική μάθηση

1.5.1 Εξόρυξη δεδομένων

Η ύπαρξη τεραστίων βάσεων δεδομένων σχετικά με τις επιστήμες, την οικονομία, τις διοικητικές ανάγκες κρατών και επιχειρήσεων κλπ., και η μεγάλη αύξηση στην υπολογιστική ισχύ, οδήγησαν στη δημιουργία του τομέα της εξόρυξης δεδομένων (data mining). Η εξόρυξη δεδομένων κατηγοριοποιείται είτε ως περιγραφική (descriptive), είτε ως προγνωστική (predictive). Στην περίπτωση της περιγραφικής εξόρυξης δεδομένων, αναζητώνται στα δεδομένα μη αναμενόμενες δομές ή σχέσεις, πρότυπα (patterns), τάσεις (trends), συστάδες (clusters) και ακραίες περιπτώσεις (outliers). Στην περίπτωση της προγνωστικής εξόρυξης δεδομένων, κατασκευάζονται μοντέλα παλινδρόμησης/παραμετροποίησης (regression), ταξινόμησης (classification), αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition) και διαδικασιών μηχανικής μάθησης (machine learning), και τα μοντέλα αυτά εφαρμόζονται σε νέα δεδομένα και αξιολογούνται. Ενδεικτικοί τομείς χρήσης μεθόδων εξόρυξης δεδομένων είναι η Αστρονομία, η μοριακή Βιολογία, η υγειονομική περίθαλψη, η προώθηση αγαθών (marketing), ο τομέας των τραπεζών, οι χρηματοοικονομικές αγορές και ο αθλητισμός (Izenman, 2008).

1.5.2 Μηχανική μάθηση

Η μηχανική μάθηση (machine learning) αναπτύχθηκε στα πλαίσια του τομέα της τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence - AI). Η τεχνητή νοημοσύνη αφορά κυρίως διαδικασίες που έχουν σκοπό να κατασκευάσουν ευφυείς μηχανές, ικανές να σκέφτονται (κατά προσέγγιση) «λογικά» όπως οι άνθρωποι και να λύνουν προβλήματα. Από την άλλη μεριά, η μηχανική μάθηση αφορά κυρίως τη δημιουργία υπολογιστικών συστημάτων και αλγορίθμων που καθιστούν τις μηχανές ικανές να «μαθαίνουν» από τις «εμπειρίες» τους. Λόγω του ότι η ευφυία δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την ικανότητα της μάθησης, η μηχανική μάθηση είναι κεντρικής σημασίας για την τεχνητή νοημοσύνη (Izenman, 2008).

Η μηχανική μάθηση κατηγοριοποιείται (α) στη μάθηση με επίβλεψη (supervised learning) και (β) στη μάθηση χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning):

(α) Η μάθηση με επίβλεψη περιλαμβάνει αλγορίθμους που προσπαθούν να προσδιορίσουν μία συνάρτηση μεταξύ των μεταβλητών «εισόδου» και των γνωστών και ορθών μεταβλητών «εξόδου» ενός συστήματος, πρόκειται δηλαδή για μία μελέτη των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου. Το σύστημα λοιπόν «εκπαιδεύεται» να προβλέπει μεταβλητές εξόδου, δεδομένων κάποιων μεταβλητών εισόδου. Όταν οι μεταβλητές εξόδου είναι συνεχείς, η

παραπάνω διαδικασία είναι ουσιαστικά μία παραμετροποίηση, ενώ όταν οι μεταβλητές εξόδου είναι διακριτές, πρόκειται για ταξινόμηση. Η μάθηση με επίβλεψη αντιστοιχεί στην προγνωστική εξόρυξη δεδομένων (Izenman, 2008).

(β) Η μάθηση χωρίς επίβλεψη περιλαμβάνει προβλήματα στα οποία δεν υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία, ή είναι επιθυμητή η επιβεβαίωσή της, άρα δεν μπορεί να υπάρξει και εκπαίδευση κάποιου συστήματος/αλγορίθμου. Αντιθέτως, εξερευνώνται και μελετώνται τα χαρακτηριστικά των μεταβλητών εισόδου για την απεικόνιση δεδομένων, προκειμένου συνήθως να αναγνωριστούν ομαδοποιήσεις/συστάδες (clustering) και χαρακτηριστικά πρότυπα και να ταξινομηθούν τα υπό διερεύνηση δεδομένα. Οι μέθοδοι χωρίς επίβλεψη κατηγοριοποιούνται σε (i) μεθόδους προβολής (projection methods), όπου τα δεδομένα υφίστανται έναν γραμμικό και ορθογώνιο μετασχηματισμό σε μία νέα βάση με τέτοιο τρόπο, ώστε να δίνεται έμφαση σε ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό, όπως είναι για παράδειγμα η διακύμανση των δεδομένων (ισοδύναμα, ο χώρος των αρχικών δεδομένων με m διαστάσεις περιστρέφεται στο $\mathbb{R}^m$ και ανακτώνται μερικές μόνο διαστάσεις), (ii) μεθόδους κλιμάκωσης πολλών διαστάσεων (multidimensional scaling), όπου μελετώνται οι «αποστάσεις» (χρησιμοποιείται ο γενικότερος όρος «ανομοιότητες» - dissimilarities) μεταξύ ζευγών δεδομένων, (iii) αλγορίθμους συσταδοποίησης (clustering algorithms), όπου τα δεδομένα κατηγοριοποιούνται σε ομάδες ώστε όσα ανήκουν στην ίδια ομάδα να μοιάζουν περισσότερο μεταξύ τους από ότι μοιάζουν με όσα ανήκουν σε άλλες ομάδες, και (iv) χάρτες αυτοοργάνωσης (self-organizing maps - SOM)), όπου κατασκευάζεται ένα πλέγμα συστάδων όπου οι παρόμοιες συστάδες τοποθετούνται σε γειτονικές θέσεις (Ripley, 1996). Η μάθηση με επίβλεψη αντιστοιχεί στην περιγραφική εξόρυξη δεδομένων (Izenman, 2008).

Υπάρχουν και περιπτώσεις όπου μία στατιστική μέθοδος δεν μπορεί να αποδοθεί μόνο σε μία από τις δύο κατηγορίες της μηχανικής μάθησης. Για παράδειγμα, η ανάλυση κυρίων συνιστωσών PCA (Principal Components Analysis) δεν χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη συγκεκριμένων μεταβλητών εξόδου, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της μάθησης χωρίς επίβλεψη. Μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί και ως μέθοδος παραμετροποίησης, όπου οι μεταβλητές εισόδου χρησιμοποιούνται και ως μεταβλητές εξόδου, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της μάθησης με επίβλεψη (Izenman, 2008)

1.6 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (PCA)

1.6.1 Εισαγωγή

Η στατιστική μέθοδος Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (Principal Components Analysis - PCA, Pearson 1901) ανήκει, όπως έχει προαναφερθεί, τόσο στις μεθόδους μάθησης χωρίς επίβλεψη, όσο και στις μεθόδους μάθησης με επίβλεψη. Χρησιμοποιείται όμως κυρίως ως μέθοδος μάθησης χωρίς επίβλεψη, και συγκεκριμένα ανήκει στην υποκατηγορία των μεθόδων προβολής. Συχνά αναφέρεται με διαφορετικά ονόματα, όπως μετασχηματισμός Karhounen-Loeve στην ηλεκτρολογία-μηχανολογία και ανάλυση ιδιοτιμών-ιδιοδιανυσμάτων (eigenvalue-eigenvector decomposition) στη στατιστική (Nisbet et al., 2009). Η μέθοδος PCA χρησιμοποιεί τις συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών ενός συνόλου δεδομένων ώστε να κατασκευάσει ένα μικρό σύνολο συνιστωσών που συνοψίζουν τις συσχετίσεις αυτές (Tabachnick and Fidell, 2006). Κατά την εφαρμογή της υλοποιείται ένας γραμμικός ορθογώνιος μετασχηματισμός ενός συνόλου δεδομένων (π.χ. φάσματα γαλαξιών) σε μία νέα βάση, ώστε να αναδεικνύεται η διακύμανση των αρχικών δεδομένων. Οι νέοι άξονες πάνω στους οποίους προβάλλονται τα νέα δεδομένα ονομάζονται Κύριες Συνιστώσες (Principal Components - PCs). Οι κύριες συνιστώσες μπορούν να περιγραφούν και ως γραμμικοί συνδυασμοί εκείνων των χαρακτηριστικών των δεδομένων τα οποία παρουσιάζουν υψηλή διακύμανση (Ripley, 1996; Hastie et al., 2001; Tso and Mather, 2001; Wall and Jenkins, 2001).

Τα επιμέρους στάδια εφαρμογής που συνιστούν τη μέθοδο PCA αναλύονται στην επόμενη παράγραφο, όπου χωρίς βλάβη της γενικότητας θεωρείται ως παράδειγμα δεδομένων ένα σύνολο φασμάτων γαλαξιών.

1.6.2 Περιγραφή

Στην περίπτωση ενός συνόλου n φασμάτων γαλαξιών $\vec{s}_i$, όπου το καθένα αποτελείται από m τιμές ροής σε αντίστοιχο αριθμό μηκών κύματος, η μέθοδος PCA εφαρμόζεται ως εξής:

α) Υπολογίζεται είτε ο πίνακας συσχέτισης (correlation matrix) είτε ο πίνακας διασπορών-συνδιασπορών (variance-covariance matrix). Στην πρώτη περίπτωση αναφερόμαστε στην κανονικοποιημένη PCA (standardized PCA), ενώ στη δεύτερη στη μη κανονικοποιημένη PCA (unstandardized PCA).

β) Υπολογίζονται οι ιδιοτιμές λ και τα ιδιοδιανύσματα $\vec{u}$ είτε του πίνακα συσχέτισης είτε του πίνακα διασπορών-συνδιασπορών, αναλόγως της επιλογής στο στάδιο (α). Τα ιδιοδιανύσματα είναι οι νέοι άξονες και αποτελούν τις Κύριες Συνιστώσες. Αν $n \geq m$ τότε υπολογίζονται m ιδιοτιμές και τα αντίστοιχα m ιδιοδιανύσματα. Στην περίπτωση φασμάτων τα ιδιοδιανύσματα αναφέρονται πολύ

συχνά και ως ιδιοφάσματα (eigenspectra).

(γ) Οι ιδιοτιμές ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά. Η πρώτη από τις Κύριες Συνιστώσες $\vec{u}_1$ (PC1) αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ιδιοτιμή λ_1 και αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό της διακύμανσης των φασμάτων. Η δεύτερη Κύρια Συνιστώσα $\vec{u}_2$ (PC2) αντιστοιχεί στη δεύτερη μεγαλύτερη ιδιοτιμή λ_2 και αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό της διακύμανσης των φασμάτων, εάν παραλειφθεί η διακύμανση που οφείλεται στην πρώτη Κύρια Συνιστώσα. Με τον ίδιο τρόπο ορίζονται και οι υπόλοιπες Συνιστώσες PC3, PC4,...,PCm.

Κάθε ένα από τα αρχικά συνθετικά φάσματα $\vec{s}_i$ αναλύεται στους νέους άξονες, δηλαδή στα ιδιοδιανύσματα $\vec{u}$ (στις Συνιστώσες PC), ως εξής:

$$\vec{s}_i = \sum_{k=1}^m a_{k,i} \vec{u}_k \quad (1.6.1)$$

όπου $a_{k,i}$ οι συντελεστές πρόσμειξης (admixture coefficients). Οι συντελεστές αυτοί αποτελούν την προβολή του i th φάσματος στην k th Κύρια Συνιστώσα. Οι κύριες συνιστώσες είναι ορθογώνιες επειδή είναι ιδιοδιανύσματα συμμετρικών πινάκων, γεγονός που καθιστά τον όλο μετασχηματισμό γραμμικό (Bailer-Jones et al., 1998).

Σε πολλές περιπτώσεις οι κυριότερες των συνιστωσών αντιπροσωπεύουν πρακτικά τη συνολική διακύμανση που χαρακτηρίζει τα φάσματα. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανακατασκευή (reconstruction) των αρχικών φασμάτων με υψηλή ακρίβεια, συμπιέζοντας σημαντικά και αποτελεσματικά τον όγκο των δεδομένων. Αν το φάσμα $s(\vec{r})_i$ αποτελεί την ανακατασκευή του αρχικού φάσματος $\vec{s}_i$ με τη χρήση των πρώτων r PCs, τότε θα είναι:

$$\overrightarrow{s(r)_i} = \sum_{k=1}^r a_{k,i} \vec{u}_k \quad (1.6.2)$$

1.6.3 Χαρακτηριστικά

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου PCA, τα δεδομένα δύνανται συνήθως να ανακατασκευαστούν ικανοποιητικά με τη χρήση έως και τριών ιδιοδιανυσμάτων (έως και το PC3), οπότε μπορούν και να απεικονιστούν σε διαγράμματα, καθιστώντας την εποπτεία τους και την περαιτέρω ανάλυσή τους ευκολότερη και αποτελεσματικότερη. Από το γεγονός αυτό απορρέουν τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου PCA, τα οποία είναι η συμπίεση δεδομένων (data compression) και η μείωση του αριθμού των διαστάσεων (dimensionality reduction). Επιπλέον, η ανακατασκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή

θορύβου από τα δεδομένα και τον προσδιορισμό των ασυνήθιστων εξ' αυτών. Για τον λόγο αυτό η μέθοδος PCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην προεργασία και προετοιμασία δεδομένων τα οποία πρόκειται στη συνέχεια να αναλυθούν από έναν ταξινομητή. Η εξαγωγή θορύβου πραγματοποιείται επειδή ο θόρυβος, εξ' ορισμού, δεν συσχετίζεται με κανένα χαρακτηριστικό των δεδομένων, και άρα δεν θα περιέχεται σε καμία περίπτωση στις κυριότερες συνιστώσες. Έτσι, η μέθοδος PCA συμπιέζει τα δεδομένα με τέτοιον τρόπο, ώστε να αφαιρούνται κατά προτίμηση χαρακτηριστικά όπως ο θόρυβος. Στην περίπτωση των φασμάτων γαλαξιών (ή αστερών), στα σπάνια ή τυχαίως κατανομημένα χαρακτηριστικά που φιλτράρονται από τη μέθοδο, περιλαμβάνονται και τα χαλασμένα pixels (scratches) και οι κοσμικές ακτίνες (Bailer-Jones et al., 1998).

Η πρώτη κύρια συνιστώσα PC1, λόγω του ότι περιέχει τη μεγαλύτερη ποσότητα διακύμανσης των δεδομένων, αναμένεται να αντιστοιχεί σε πληροφορία την οποία μοιράζονται το σύνολο ή η μεγάλη πλειοψηφία αυτών (Tso and Mather, 2001). Στην περίπτωση των φασμάτων γαλαξιών για παράδειγμα, αναμένεται να συσχετίζεται με τη λαμπρότητα (Karampelas et al., 2012). Από την άλλη μεριά, η δεύτερη κύρια συνιστώσα PC2 αναμένεται να αντιστοιχεί σε πληροφορία μικρότερης σημασίας σε όρους διακύμανσης, η οποία από κατασκευής δεν συσχετίζεται καθόλου με την πρώτη συνιστώσα. Στην περίπτωση των φασμάτων η ανάλυση PCA δεν μπορεί να απομονώσει πλήρως τα φασματικά χαρακτηριστικά στις κύριες συνιστώσες, επειδή το φάσμα είναι ένας μη γραμμικός συνδυασμός των χαρακτηριστικών αυτών, ενώ η μέθοδος μετασχηματισμού είναι γραμμική (Bailer-Jones et al., 1998).

Αν και το εκάστοτε σύνολο δεδομένων μπορεί να περιγραφεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια χρησιμοποιώντας τις πρώτες/σημαντικότερες συνιστώσες, θα πρέπει να σημειωθεί η επιφύλαξη του κατά πόσον δεν περιέχεται μετρήσιμη πληροφορία στις υπόλοιπες εξ' αυτών (Tso and Mather, 2001), ιδιαίτερα όταν αναζητώνται εντός ενός συνόλου δεδομένων εκείνες οι εγγραφές οι οποίες παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που είτε εμφανίζονται σε ένα μικρό κλάσμα των δεδομένων είτε είναι πολύ ασθενή (Bailer-Jones et al., 1998). Επίσης, η μέθοδος είναι πλήρως εξαρτημένη από τα δεδομένα. Έτσι, αν κάθε εγγραφή του συνόλου δεδομένων περιέχει διαφορετικού είδους χαρακτηριστικά, θα πρέπει να προηγηθεί της εφαρμογής της μεθόδου κάποια κατάλληλη κανονικοποίηση.

1.6.4 Ερευνητικές εφαρμογές

Μεταξύ των πολυάριθμων σχετικών ανακοινώσεων σχετικά με τη χρήση της μεθόδου PCA στην Αστρονομία, αναφέρονται ενδεικτικά οι σχετικές εφαρμογές σε φάσματα αστερών του Michigan Spectral Survey (Bailer-Jones et al., 1998) και του SDSS/SEGUE project (Re Fiorentin et al., 2007), σε φάσματα γαλαξιών των SDSS (Yip et al., 2004), DEEP2 Redshift Survey (Madgwick et al.,

2003), 2dF Galaxy Redshift Survey (Folkes et al., 1999) και Spitzer Infrared Spectrograph (Wang et al., 2011), καθώς και σε παρατηρήσεις φασματικής απεικόνισης (spectroscopic imaging observations), όπου είναι διαθέσιμες και χωρικές πληροφορίες (Heyer and Schloerb, 1997; Steiner et al., 2009). Ιδιαίτερα στη μελέτη των Steiner et al. (2009) παρουσιάζεται η ανακάλυψη ενός ενεργού πυρήνα (active nucleus) στον γαλαξία ασθενούς λαμπρότητας NGC 4736, με τη βοήθεια της μεθόδου PCA. Επιπροσθέτως, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση συνθετικών φασμάτων γαλαξιών διαφορετικών ηλικιών, ιστορικών αστρικής δημιουργίας και μεταλλικότητας που δημιουργήθηκαν με το μοντέλο PÉGASE (Ronen et al., 1999), καθώς και στην απεικόνιση συνθετικών φασμάτων γαλαξιών του μοντέλου PÉGASE που αντιστοιχούν στους μορφολογικούς τύπους του Hubble (Tsalmantza et al., 2007).

Η ικανότητα όμως της στατιστικής μεθόδου PCA να συμπιέζει τα δεδομένα και να μειώνει τον αριθμό των διαστάσεών τους, την καθιστά σημαντική σε όλα τα ερευνητικά πεδία. Ενδεικτικά αναφέρεται η εφαρμογή της στη γραφολογία (Hastie et al., 2001), στην αναγνώριση προσώπων (Turk and Pentland, 1991a,b) και αποτυπωμάτων (Yongxu et al., 2006), στη μηχανολογία (Sanguansat, 2012) και στην ανάλυση της γονιδιακής αλληλουχίας (Gorban and Zinovyev, 2005).

1.7 Support Vector Machines (SVM)

Η μέθοδος Support Vector Machines (Vapnik, 1995) ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων μάθησης με επίβλεψη. Δύναται να εφαρμοστεί για την ταξινόμηση δεδομένων μέσω του προσδιορισμού ενός βέλτιστου υπερεπιπέδου το οποίο διαχωρίζει τα μέλη της κάθε κλάσης που χαρακτηρίζουν τα δεδομένα. Για την εύρεση ενός τέτοιου υπερεπιπέδου απαιτείται ένα σύνολο μεταβλητών εισόδου που αντιστοιχούν σε γνωστές κλάσεις (μεταβλητές εξόδου), και στο οποίο η μέθοδος SVM «εκπαιδεύεται» να τις αναγνωρίζει. Έτσι, καθίσταται ικανή να προβλέπει τις αντίστοιχες κλάσεις που χαρακτηρίζουν άλλα σύνολα δεδομένων, για τα οποία η σχετική πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

Πέραν της ταξινόμησης δεδομένων, η ίδια μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραμετροποίηση δεδομένων. Όπως και στην περίπτωση της ταξινόμησης, απαιτείται ένα σύνολο μεταβλητών εισόδου με γνωστές τις τιμές των υπό μελέτη παραμέτρων (μεταβλητές εξόδου), στο οποίο η μέθοδος SVM «εκπαιδεύεται» να τις υπολογίζει. Έτσι, καθίσταται ικανή να προβλέπει τις τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν άλλα σύνολα δεδομένων, για τα οποία η σχετική πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη. Τονίζεται ότι η μέθοδος SVM «εκπαιδεύεται» κάθε φορά σε μία παράμετρο.

Μεταξύ των σχετικών ανακοινώσεων σχετικά με τη χρήση της μεθόδου SVM στην Αστρονομία, αναφέρονται ενδεικτικά οι σχετικές εφαρμογές σε φάσματα γαλαξιών (Wadadekar, 2005; Tsalmantza et al., 2007, 2009, 2012; Huertas-Company et al., 2008; Bellas-Velidis et al., 2010, 2012; Karampelas et al., 2012), στην ηλιακή φυσική (Tiwari et al., 2009), στους ερυθρούς μεταβλητούς αστέρες (Woźniak et al., 2004) κλπ. Πέραν της Αστρονομίας, η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί, μεταξύ άλλων, και σε προβλήματα αναγνώρισης χειρόγραφων ψηφίων, κατηγοριοποίησης κειμένου και ταξινόμησης νεφών (Izenman, 2008).

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η πλήρης διαδικασία ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων και τα σχετικά αποτελέσματα, σύμφωνα με τους στόχους της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής. Η διαδικασία αυτή αφορά την ανάλυση και επεξεργασία της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης φασμάτων γαλαξιών, τη βελτιστοποίηση της προ της παρούσας διατριβής συνθετικής βιβλιοθήκης φασμάτων γαλαξιών, τη δημιουργία της νέας συνθετικής βιβλιοθήκης, τη δημιουργία συνθετικών φασμάτων με επεισοδιακή αστρογέννεση, καθώς και τα πεπραγμένα σχετικά με τη συνθετική βιβλιοθήκη υψηλής διακριτικής ικανότητας.

Πίνακας 2.1: Ο αριθμός των γαλαξιών του SDSS που ταυτοποιήθηκαν σε κάθε φασματικό τύπο της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών.

Φασματικός τύπος	Αριθμός γαλαξιών SDSS
Γαλαξίες Προγενέστερου φασματικού τύπου	17 995
Σπειροειδείς γαλαξίες	11 122
Ανώμαλοι γαλαξίες	2 761
QSFG	1 792

2.1 Βιβλιοθήκη ημι-εμπειρικών φασμάτων

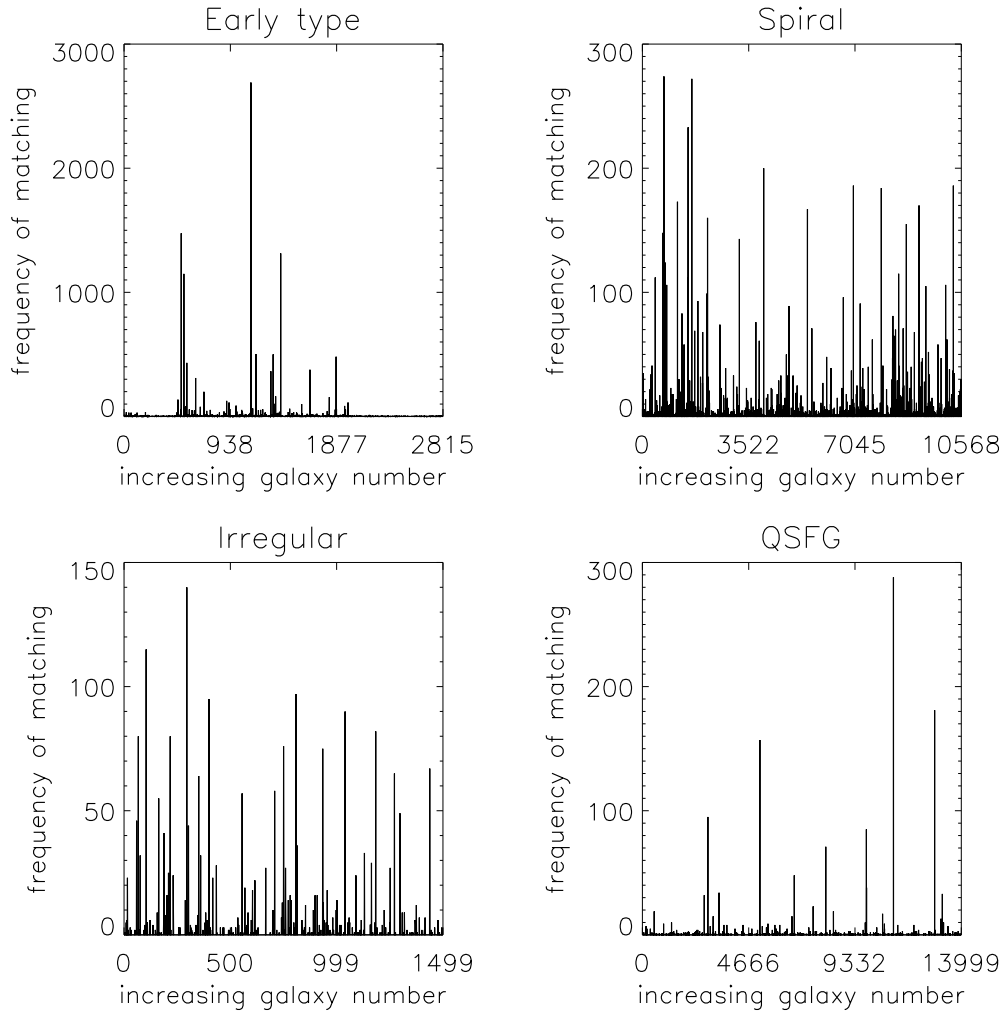
2.1.1 Τυπικά φάσματα

Η διερεύνηση της σύγκρισης μεταξύ των φασμάτων γαλαξιών της συνθετικής βιβλιοθήκης και των παρατηρηθέντων φασμάτων γαλαξιών από το SDSS, μπορεί να αποφέρει μερικά πολύ ενδιαφέροντα και χρήσιμα αποτελέσματα. Στον πίνακα 2.1 δίνεται ο αριθμός των γαλαξιών του SDSS που ταυτοποιήθηκαν σε κάθε φασματικό τύπο της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η συχνότητα ταύτισης κάθε συνθετικού φάσματος γαλαξία με κάποιο από τα φάσματα γαλαξιών του SDSS, για κάθε φασματικό τύπο. Από τη μελέτη του σχήματος αυτού γίνεται φανερό πως υπάρχουν συγκεκριμένα συνθετικά φάσματα, το συνεχές των οποίων ταυτίζεται επανειλημένως με συνεχή πραγματικών φασμάτων. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι τα παραπάνω συνθετικά φάσματα ενδέχεται να είναι περισσότερο τυπικά και ρεαλιστικά από τα υπόλοιπα. Το συμπέρασμα αυτό αποτέλεσε μία ακόμα ένδειξη για την ανάγκη βελτιστοποίησης της βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών.

2.1.2 Ταξινόμηση και παραμετροποίηση

Για τη δημιουργία στατιστικών μοντέλων που επιτρέπουν την πρόβλεψη του φασματικού τύπου και των αστροφυσικών παραμέτρων των φασμάτων γαλαξιών, έγινε εφαρμογή του αλγόριθμου SVM στα προσομοιωμένα φάσματα γαλαξιών της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης (Tsalmantza et al., 2012) του τέταρτου κύκλου προσομοιώσεων της κοινοπραξίας DPAC (βιβλιοθήκη Lib4). Στα φάσματα αυτά, τα οποία έχουν προσομοιωθεί για τρία μεγέθη ($G = 15, 18$ και 20), έχει προστεθεί θόρυβος.

Η επιτυχής εφαρμογή της μεθόδου SVM προϋποθέτει το διαχωρισμό του δείγματος σε δύο σύνολα: στο πρώτο σύνολο εντάσσονται τα φάσματα που χρησιμοποιούνται για την «εκπαίδευση» του κώδικα πρόβλεψης των παραμέτρων και τη δημιουργία των αντίστοιχων στατιστικών μοντέλων (δείγμα εκπαίδευσης



Σχήμα 2.1: Η συχνότητα ταύτισης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών με τα φάσματα γαλαξιών του SDSS, για κάθε φασματικό τύπο. Κάθε γαλαξίας αντιπροσωπεύεται από τον αύξοντα αριθμό του.

- training set), ενώ στο δεύτερο σύνολο εντάσσονται τα φάσματα στα οποία γίνεται ο έλεγχος της ποιότητας των μοντέλων αυτών (δείγμα δοκιμών - testing set).

Για κάθε ένα από τα τρία μεγέθη ($G = 15, 18$ και 20) έγινε τυχαία επιλογή και τοποθέτηση στο δείγμα εκπαίδευσης του ενός έκτου επί του συνόλου των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης. Τα υπόλοιπα φάσματα τοποθετήθηκαν στο δείγμα δοκιμών. Τόσο στο δείγμα εκπαίδευσης, όσο και στο δείγμα δοκιμών, τα φάσματα κανονικοποιήθηκαν ώστε σε κάθε pixel η μέση τιμή να είναι ίση με μηδέν και η διακύμανση να είναι ίση με τη μονάδα.

Πρόβλεψη του φασματικού τύπου

Τρία μοντέλα SVMs για τα μεγέθη $G = 15, 18$ και 20 «εκπαιδεύτηκαν» στο δείγμα εκπαίδευσης ως προς την πρόβλεψη του φασματικού τύπου των προσομοιωμένων ημι-εμπειρικών φασμάτων γαλαξιών, και η εφαρμογή τους έγινε στο δείγμα δοκιμών. Στον πίνακα 2.2 παρατίθενται τα αποτελέσματα για το δείγμα εκπαίδευσης. Ένας τέτοιος πίνακας ονομάζεται πίνακας σύγχυσης (confusion matrix), καθώς αποτελεί ένα μέτρο του βαθμού σφάλματος του στατιστικού μοντέλου ταξινόμησης. Στην προκειμένη περίπτωση, αποδίδει το κατά πόσο συγχέονται οι διάφοροι φασματικοί τύποι μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται με εποπτικό τρόπο στο σχήμα 2.2.

Ο πίνακας 2.3 είναι ο πίνακας σύγχυσης του δείγματος δοκιμών για τα μεγέθη $G = 15, 18$ και 20 . Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται με εποπτικό τρόπο στο σχήμα 2.3. Το σχήμα 2.4 δείχνει τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται το ποσοστό των επιτυχών προβλέψεων του φασματικού τύπου των φασμάτων του δείγματος δοκιμών με το μέγεθος G , τόσο για το σύνολο των φασμάτων αυτών, όσο και για κάθε φασματικό τύπο ξεχωριστά. Ο Πίνακας 2.4 περιέχει τα αποτελέσματα της ταξινόμησης στους διάφορους φασματικούς τύπους στην περίπτωση των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών μεγέθους $G = 18.5$ (Tsalmantza et al., 2009), και παρατίθεται για σύγκριση. Τα φάσματα του δείγματος αυτού παρουσιάζουν ερυθρομετατόπιση αλλά όχι απορρόφηση.

Από τη σύγκριση μεταξύ του πίνακα 2.2 και του σχήματος 2.2 με τον πίνακα 2.3 και το σχήμα 2.3, γίνεται σαφές πως τα ποσοστά επιτυχούς ταξινόμησης του δείγματος εκπαίδευσης είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα ποσοστά του δείγματος δοκιμών, όπου τα στατιστικά μοντέλα ταξινόμησης βρίσκουν εφαρμογή σε «άγνωστα» φάσματα. Στη συνέχεια θα αναφερόμαστε μόνο στα αποτελέσματα ως προς το δείγμα δοκιμών, γιατί αυτό προσδιορίζει την απόδοση του συστήματος UGC.

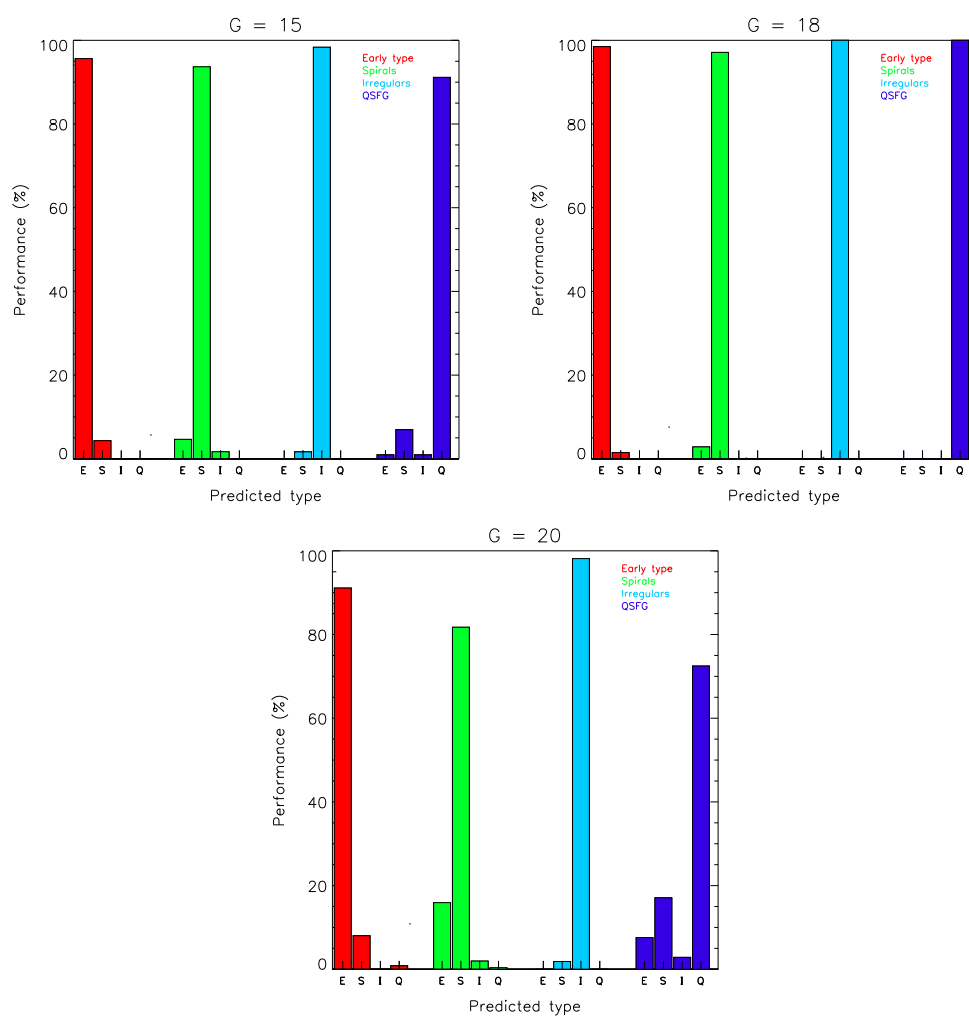
Είναι φανερό ότι το ποσοστό των ορθών ταξινομήσεων στο σύνολο των φασμάτων του δείγματος δοκιμών είναι υψηλότερο για τα φάσματα με λαμπρότερο μέγεθος G , όπως άλλωστε είναι αναμενόμενο. Το ποσοστό αυτό ποικίλει από

Πίνακας 2.2: Ο πίνακας σύγχυσης (confusion matrix) των προσομοιωμένων φασμάτων γαλαξιών της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης του δείγματος εκπαίδευσης για τα μεγέθη $G = 15, 18$ και 20 . Σε κάθε μία κατηγορία του μεγέθους G , οι στήλες αντιπροσωπεύουν τους αληθείς φασματικούς τύπους και οι σειρές τους προβλεφθέντες. Τα σύμβολα E, S, I και QSFG αντιστοιχούν σε γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου, σπειροειδείς, ανώμαλους και QSFG, αντίστοιχα. Οι τιμές είναι ποσοστά επί τοις εκατό.

	G = 15			
Τύπος	E	S	I	QSFG
E	98.5	1.5	0.0	0.0
S	2.8	97.1	0.1	0.0
I	0.0	0.0	100.0	0.0
QSFG	0.0	0.0	0.0	100.0
				Σύνολο
				98.3

	G = 18			
Τύπος	E	S	I	QSFG
E	95.6	4.3	0.0	0.0
S	4.6	93.7	1.7	0.0
I	0.0	1.7	98.3	0.0
QSFG	0.9	7.0	0.9	91.1
				Σύνολο
				95.0

	G = 20			
Τύπος	E	S	I	QSFG
E	91.1	8.0	0.0	0.8
S	15.9	81.7	2.0	0.4
I	0.0	1.9	98.1	0.0
QSFG	7.6	17.1	2.8	72.5
				Σύνολο
				87.6



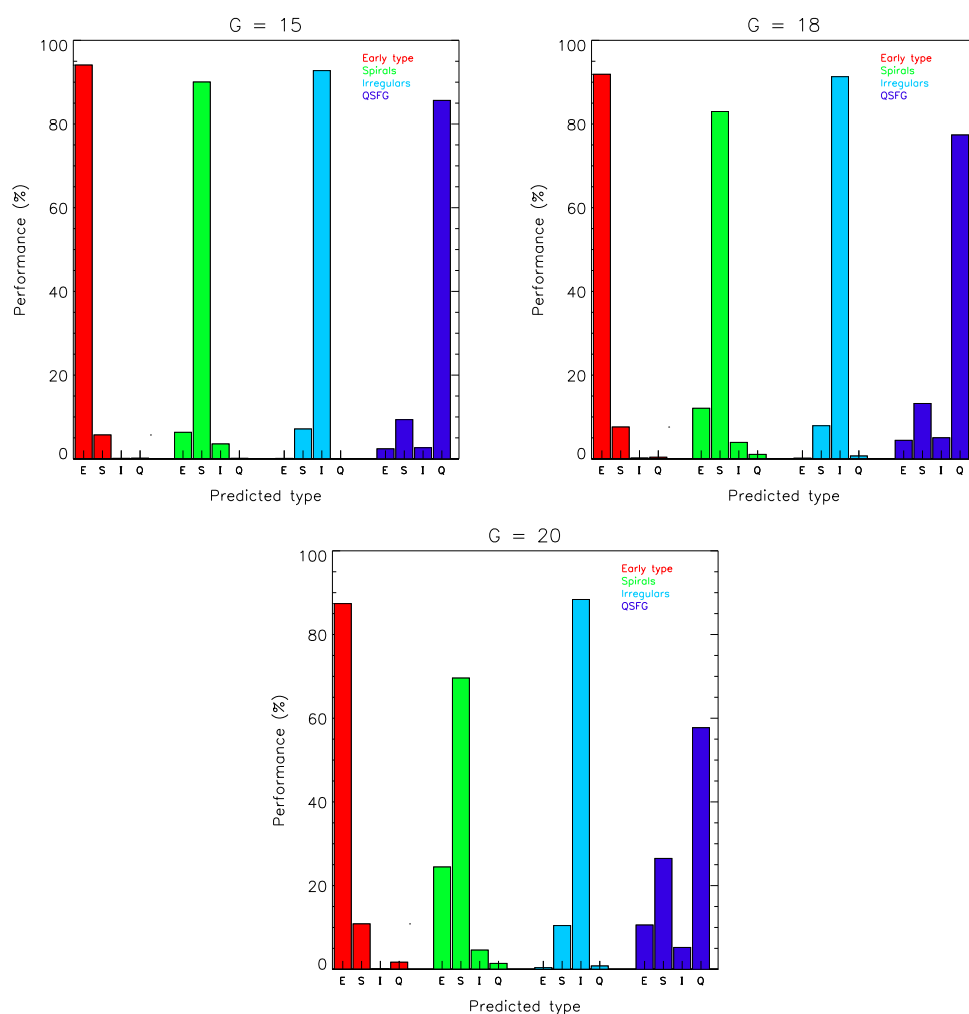
Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση του πίνακα σύγχυσης (confusion matrix) των προσομοιωμένων φασμάτων των γαλαξιών της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης του δείγματος εκπαίδευσης μεγέθους $G = 15$ (πάνω αριστερά), 18 (πάνω δεξιά) και 20 (κάτω), αντίστοιχα.

Πίνακας 2.3: Ο πίνακας σύγχυσης (confusion matrix) των προσομοιωμένων φασμάτων γαλαξιών της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης του δείγματος δοκιμών για τα μεγέθη $G = 15, 18$ και 20 . Σε κάθε μία κατηγορία του μεγέθους G , οι στήλες αντιπροσωπεύουν τους αληθείς φασματικούς τύπους και οι σειρές τους προβλεφθέντες. Τα σύμβολα E, S, I και QSFG αντιστοιχούν σε γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου, σπειροειδείς, ανώμαλους και QSFG, αντίστοιχα. Οι τιμές είναι ποσοστά επί τοις εκατό.

	G = 15				
Τύπος	E	S	I	QSFG	
E	94.1	5.7	0.1	0.1	
S	6.3	90.0	3.5	0.1	
I	0.1	7.1	92.8	0.0	
QSFG	2.4	9.3	2.6	85.6	Σύνολο 92.2

	G = 18				
Τύπος	E	S	I	QSFG	
E	91.9	7.6	0.2	0.4	
S	12.1	83.0	3.9	1.0	
I	0.1	7.9	91.3	0.7	
QSFG	4.4	13.2	5.0	77.4	Σύνολο 88.1

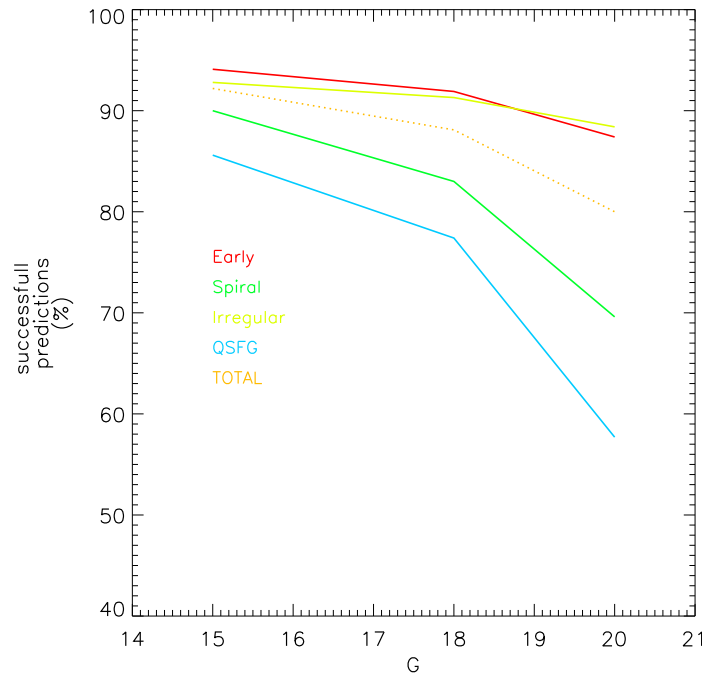
	G = 20				
Τύπος	E	S	I	QSFG	
E	87.4	10.8	0.1	1.7	
S	24.4	69.6	4.6	1.4	
I	0.4	10.4	88.4	0.8	
QSFG	10.6	26.5	5.2	57.7	Σύνολο 80.0



Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση του πίνακα σύγχυσης (confusion matrix) των προσομοιωμένων φασμάτων των γαλαξιών της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης του δείγματος δοκιμών μεγέθους $G = 15$ (πάνω αριστερά), 18 (πάνω δεξιά) και 20 (κάτω), αντίστοιχα.

Πίνακας 2.4: Ο πίνακας σύγχυσης (confusion matrix) των προσομοιωμένων φασμάτων των γαλαξιών της συνθετικής βιβλιοθήκης του δείγματος δοκιμών μεγέθους $G = 18.5$ (Tsalmantza et al., 2009). Οι στήλες αντιπροσωπεύουν τους αληθείς φασματικούς τύπους και οι σειρές τους προβλεπθέντες. Τα σύμβολα E, S, I και QSFG αντιστοιχούν σε γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου, σπειροειδείς, ανώμαλους και QSFG, αντίστοιχα. Οι τιμές είναι ποσοστά επί τοις εκατό.

	G = 18.5				
Τύπος	E	S	I	QSFG	
E	73.7	26.2	0.0	0.1	
S	1.4	97.3	1.0	0.3	
I	0.0	15.2	81.9	2.9	
QSFG	0.0	1.3	0.3	98.4	Σύνολο
					94.8



Σχήμα 2.4: Το ποσοστό των επιτυχών ταξινόμησεων των προσομοιωμένων φασμάτων των γαλαξιών της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης του δείγματος δοκιμών συναρτήσει του μεγέθους G για το σύνολο των φασμάτων αυτών και για κάθε φασματικό τύπο ξεχωριστά.

80 % ($G = 20$) σε 92.2 % ($G = 15$). Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από τη μελέτη της μεταβολής του ποσοστού των επιτυχών προβλέψεων με το μέγεθος για κάθε φασματικό τύπο ξεχωριστά. Παρόλα αυτά υπάρχουν διαφορές μεταξύ των φασματικών τύπων ως προς την ικανότητα ορθής ταξινόμησης: Οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και οι ανώμαλοι γαλαξίες ταξινομούνται με μεγαλύτερη επιτυχία σε σχέση με τους σπειροειδείς γαλαξίες και τους QSFG. Επίσης, οι εσφαλμένα ταξινομημένοι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου ταξινομούνται κυρίως ως σπειροειδείς και το αντίστροφο, ενώ οι εσφαλμένα ταξινομημένοι ανώμαλοι γαλαξίες και οι QSFG ταξινομούνται κυρίως ως σπειροειδείς.

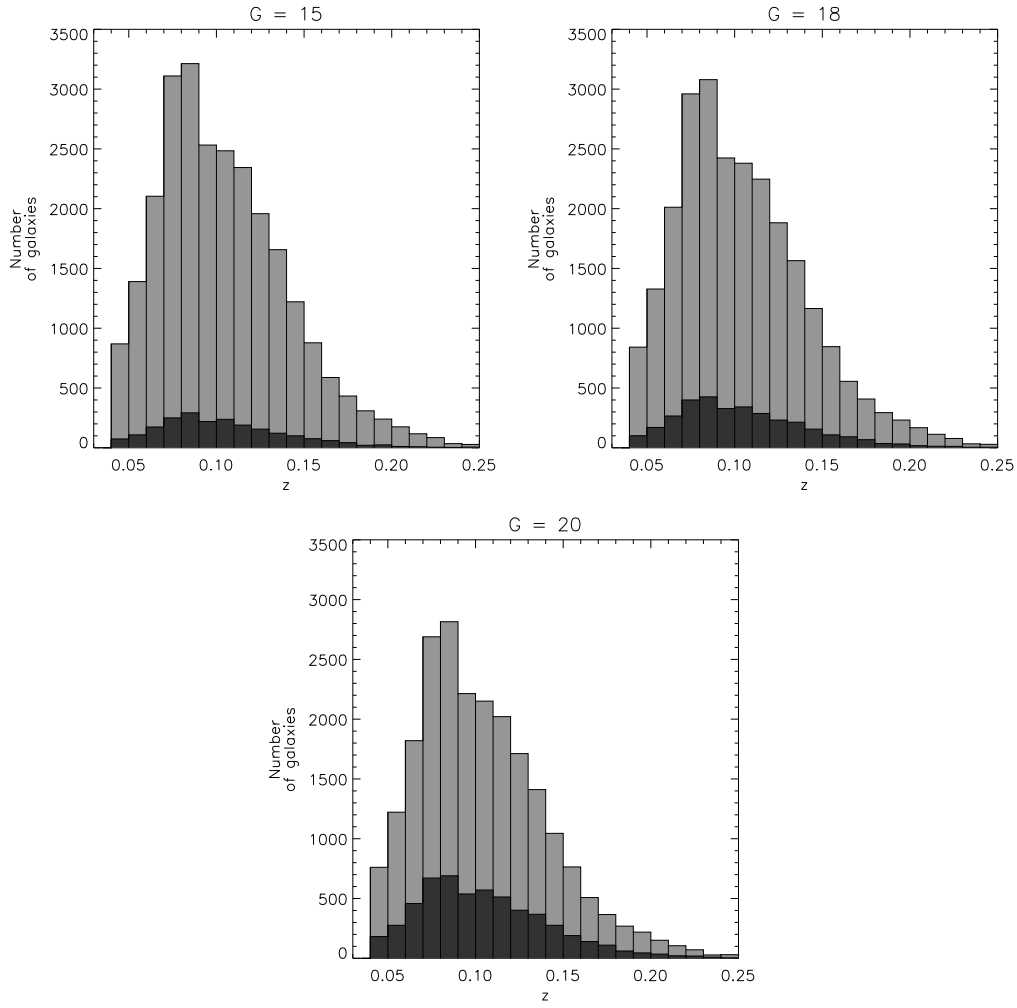
Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γίνει σύγκριση μεταξύ της ικανότητας ταξινόμησης στους φασματικούς τύπους της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης και της αντίστοιχης ικανότητας της συνθετικής βιβλιοθήκης. Η σύγκριση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη σύγκριση του τμήματος του Πίνακα 2.3, που αναφέρεται στο μέγεθος $G = 18$ των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης, και του Πίνακα 2.4, που αναφέρεται στο μέγεθος $G = 18.5$ των προσομοιωμένων φασμάτων της συνθετικής βιβλιοθήκης (Tsalmantza et al., 2009). Τα ημι-εμπειρικά φάσματα αναμένεται να είναι ρεαλιστικότερα των συνθετικών, περιέχουν όμως την επίδραση της απορρόφησης για την οποία δεν υπάρχει πληροφορία. Τόσο το πρώτο σύνολο φασμάτων, όσο και το δεύτερο, χαρακτηρίζονται από ένα εύρος τιμών της ερυθρομετατόπισης z .

Από την παραπάνω σύγκριση προκύπτει πως οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου καθώς και οι ανώμαλοι γαλαξίες ταξινομούνται ορθότερα στην περίπτωση των ημι-εμπειρικών φασμάτων, ενώ οι σπειροειδείς γαλαξίες και οι QSFG ταξινομούνται ορθότερα στην περίπτωση των συνθετικών φασμάτων. Το υψηλότερο ποσοστό των επιτυχών προβλέψεων του φασματικού τύπου των συνθετικών φασμάτων ενδέχεται να ερμηνεύεται μερικώς από το υψηλό ποσοστό των φασμάτων QSFG επί του συνόλου των συνθετικών φασμάτων.

Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η κατανομή των ορθά ταξινομημένων και των εσφαλμένα ταξινομημένων προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης στο εύρος της ερυθρομετατόπισης z , για τα διάφορα μεγέθη G . Από τη μελέτη του σχήματος αυτού δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση μεταξύ της ικανότητας ταξινόμησης και της ερυθρομετατόπισης. Τόσο τα φάσματα των οποίων ο φασματικός τύπος έχει προβλεφθεί επιτυχώς, όσο και τα φάσματα των οποίων ο φασματικός τύπος έχει προβλεφθεί ανεπιτυχώς, κατανέμονται με τον ίδιο τρόπο στο πλήρες εύρος των τιμών της ερυθρομετατόπισης.

Πρόβλεψη της ερυθρομετατόπισης

Τρία μοντέλα SVMs για τα μεγέθη $G = 15$, 18 και 20 «εκπαιδεύτηκαν» στο δείγμα εκπαίδευσης ως προς την πρόβλεψη της ερυθρομετατόπισης των προσο-

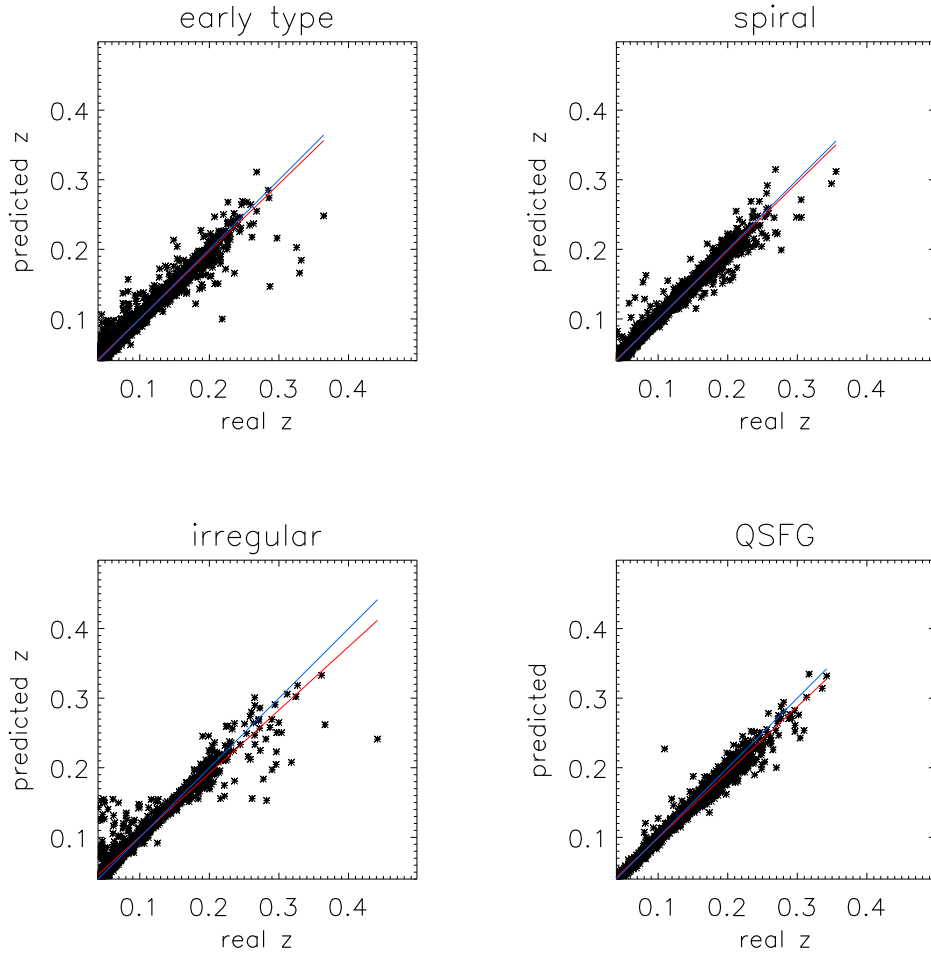


Σχήμα 2.5: Η κατανομή των ορθά ταξινομημένων (γκρι) και των εσφαλμένα ταξινομημένων (μαύρο) προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης του δείγματος δοκιμών στο εύρος της ερυθρομετατόπισης z , για τα μεγέθη $G = 15$ (πάνω αριστερά), 18 (πάνω δεξιά) και 20 (κάτω), αντίστοιχα.

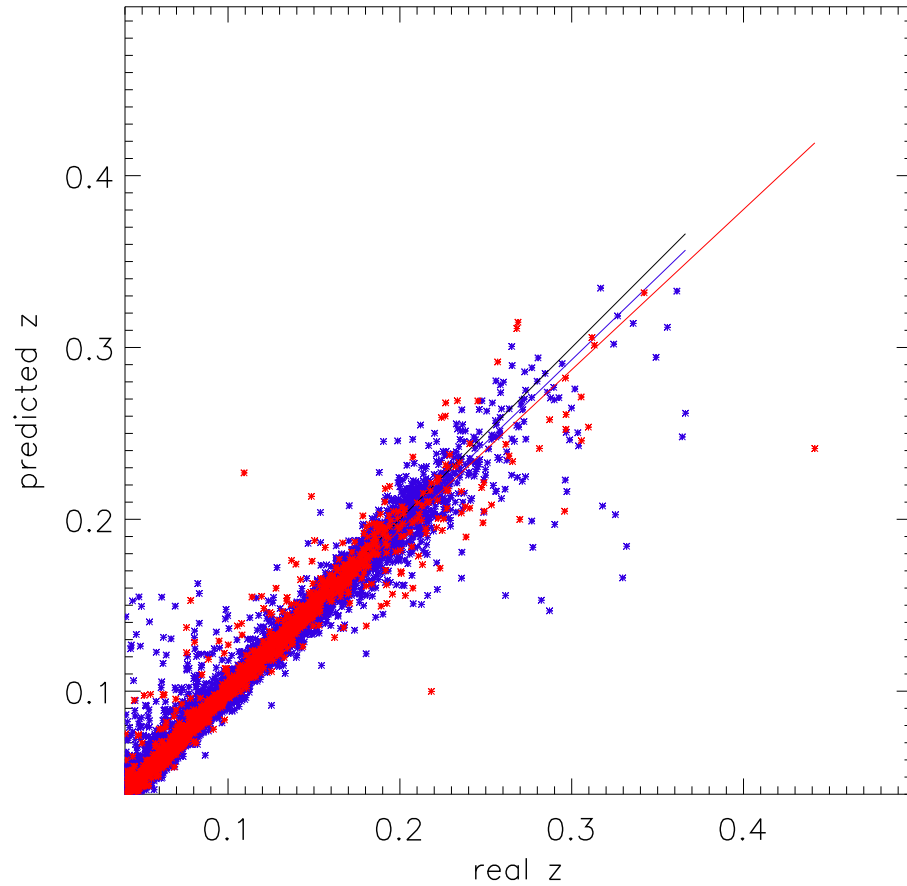
Πίνακας 2.5: Το μέσο απόλυτο σφάλμα των προβλέψεων της ερυθρομετατόπισης για τα διάφορα μεγέθη G . Στις παρενθέσεις παρατίθενται οι τιμές των μέσων απόλυτων εκατοστιαίων σφαλμάτων των γαλαξιών με $z \leq 0.2$.

	$G = 15$	$G = 18$	$G = 20$
Σύνολο γαλαξιών δείγματος δοκιμών	3.2 (3.1)	4.9 (4.8)	9.0 (8.8)
Ορθώς ταξινομημένοι γαλαξίες	3.1 (3.0)	4.7 (4.7)	8.6 (8.5)
Εσφαλμένως ταξινομημένοι γαλαξίες	4.1 (3.8)	6.2 (5.8)	10.6 (10.2)
Γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου	2.9 (2.9)	4.5 (4.4)	8.6 (8.6)
Σπειροειδείς γαλαξίες	2.7 (2.7)	4.8 (4.7)	8.8 (8.6)
Ανώμαλοι γαλαξίες	5.7 (5.5)	7.4 (7.2)	11.1 (10.6)
QSFG	4.3 (4.1)	6.0 (5.7)	10.2 (9.4)

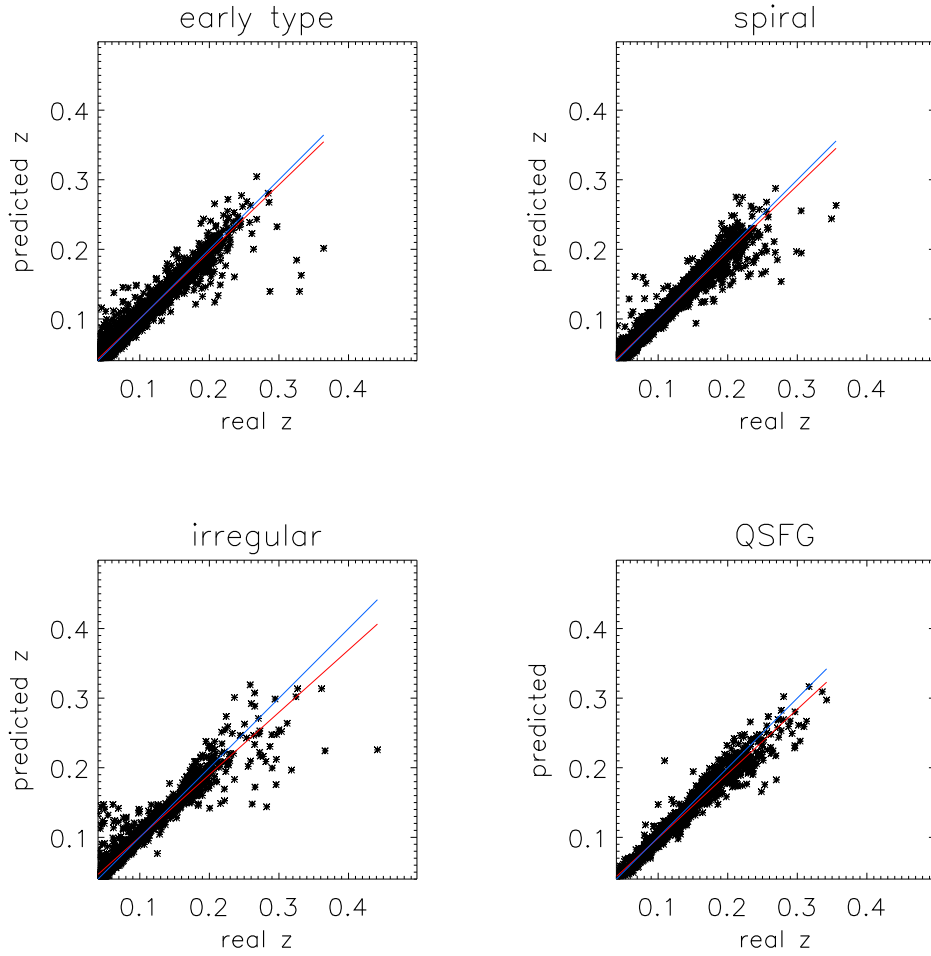
μοιωμένων ημι-εμπειρικών φασμάτων γαλαξιών, και η εφαρμογή τους έγινε στο δείγμα δοκιμών. Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται τα μέσα απόλυτα εκατοστιαία σφάλματα της πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης $\frac{1}{N} \sum_i \frac{|(z_{real})_i - (z_{predicted})_i|}{(z_{real})_i}$, όπου z_{real} είναι η πραγματική τιμή της ερυθρομετατόπισης, $z_{predicted}$ η προβλεφθείσα και N ο αριθμός των γαλαξιών του δείγματος δοκιμών για κάθε περίπτωση, με $1 \leq i \leq N$. Στις παρενθέσεις παρατίθενται οι τιμές των μέσων απόλυτων εκατοστιαίων σφαλμάτων των γαλαξιών με $z \leq 0.2$. Σε αυτό το εύρος των ερυθρομετατοπίσεων αναμένεται να περιλαμβάνονται οι περισσότεροι από τους γαλαξίες που πρόκειται να παρατηρήσει ο δορυφόρος Gaia. Στις εικόνες 2.6 - 2.11 παρουσιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα για τα διάφορα μεγέθη G . Στις εικόνες αυτές πραγματοποιείται σύγκριση των πραγματικών τιμών της ερυθρομετατόπισης με τις προβλεφθείσες τιμές μέσω των SVMs. Επιπροσθέτως, παρουσιάζονται οι γραμμικές προσαρμογές που χαρακτηρίζουν τα αποτελέσματα του δείγματος δοκιμών, ώστε να γίνει σύγκριση με την ιδανική περίπτωση της ορθής πρόβλεψης του συνόλου των τιμών των ερυθρομετατοπίσεων, δηλαδή με την ευθεία $y = x$. Αυτό συμβαίνει τόσο για κάθε φασματικό τύπο γαλαξιών ξεχωριστά, όσο και ως προς την ορθότητα της ταξινόμησης στον κάθε φασματικό τύπο.



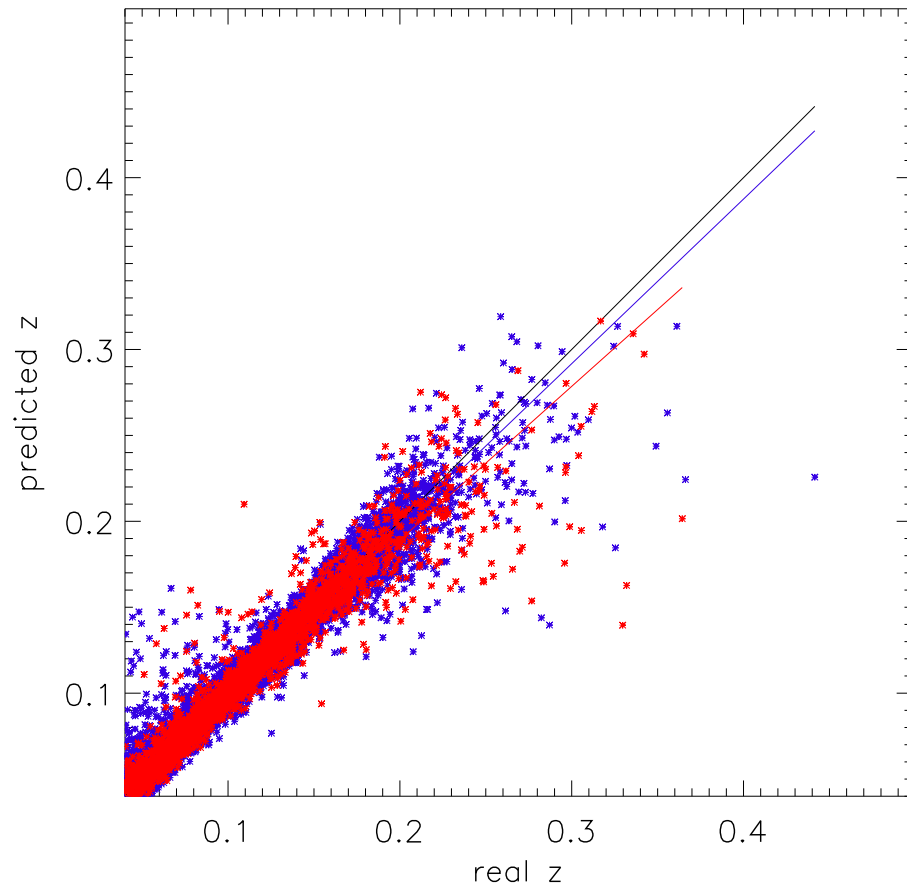
Σχήμα 2.6: Οι προβλεφθείσες τιμές της ερυθρομετατόπισης z των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης συναρτήσει των αντίστοιχων πραγματικών τιμών για το μέγεθος $G = 15$ και για κάθε φασματικό τύπο. Η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει την ιδανική περίπτωση της ορθής πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, ενώ η μπλε γραμμή αποτελεί τη γραμμική προσαρμογή που χαρακτηρίζει τα αποτελέσματα του δείγματος δοκιμών.



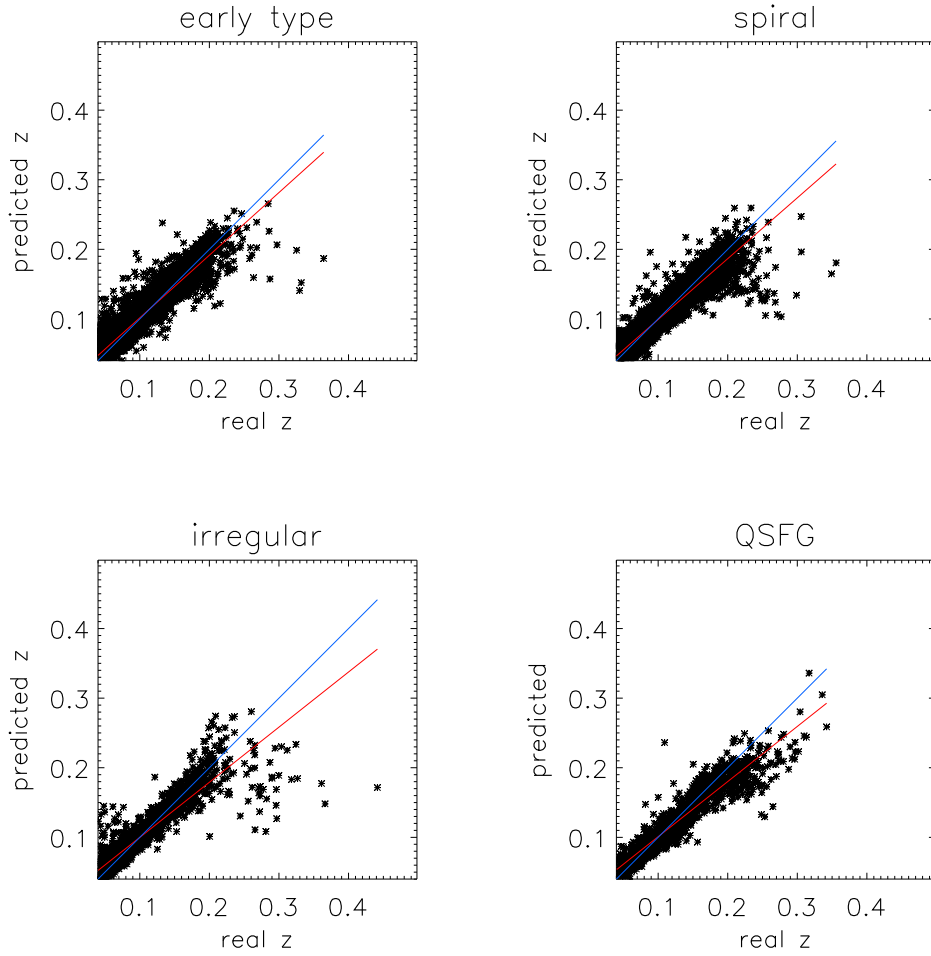
Σχήμα 2.7: Οι προβλεφθείσες τιμές της ερυθρομετατόπισης z των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης συναρτήσει των αντίστοιχων πραγματικών τιμών των ορθά ταξινομημένων (μπλε αστερίσκοι) και των εσφαλμένα ταξινομημένων (κόκκινοι αστερίσκοι) φασμάτων μέγεθους $G = 15$. Η μαύρη γραμμή υποδεικνύει την ιδανική περίπτωση της ορθής πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, ενώ η μπλε και η κόκκινη γραμμή αποτελούν τις γραμμικές προσαρμογές που χαρακτηρίζουν τους ορθά και τους εσφαλμένα ταξινομημένους γαλαξίες του δείγματος δοκιμών.



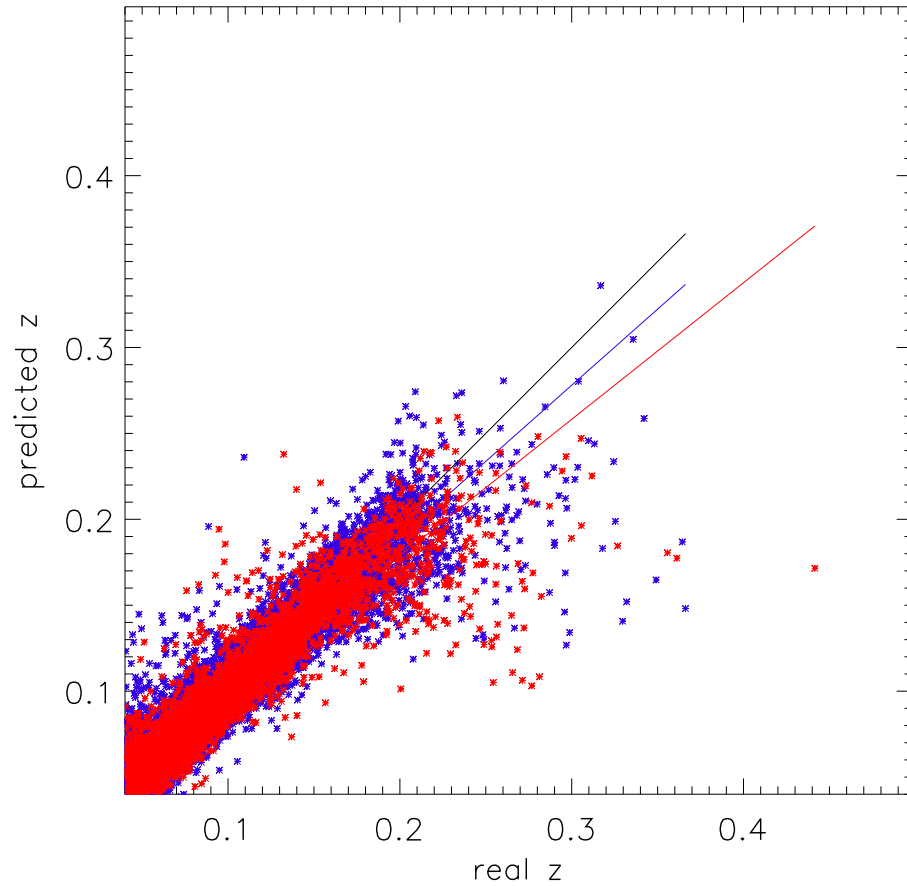
Σχήμα 2.8: Οι προβλεφθείσες τιμές της ερυθρομετατόπισης z των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης συναρτήσει των αντίστοιχων πραγματικών τιμών για το μέγεθος $G = 18$ και για κάθε φασματικό τύπο. Η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει την ιδανική περίπτωση της ορθής πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, ενώ η μπλε γραμμή αποτελεί τη γραμμική προσαρμογή που χαρακτηρίζει τα αποτελέσματα του δείγματος δοκιμών.



Σχήμα 2.9: Οι προβλεφθείσες τιμές της ερυθρομετατόπισης z των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης συναρτήσει των αντίστοιχων πραγματικών τιμών των ορθά ταξινομημένων (μπλε αστερίσκοι) και των εσφαλμένα ταξινομημένων (κόκκινοι αστερίσκοι) φασμάτων μέγεθους $G = 18$. Η μαύρη γραμμή υποδεικνύει την ιδανική περίπτωση της ορθής πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, ενώ η μπλε και η κόκκινη γραμμή αποτελούν τις γραμμικές προσαρμογές που χαρακτηρίζουν τους ορθά και τους εσφαλμένα ταξινομημένους γαλαξίες του δείγματος δοκιμών.



Σχήμα 2.10: Οι προβλεφθείσες τιμές της ερυθρομετατόπισης z των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης συναρτήσει των αντίστοιχων πραγματικών τιμών για το μέγεθος $G = 20$ και για κάθε φασματικό τύπο. Η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει την ιδανική περίπτωση της ορθής πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, ενώ η μπλε γραμμή αποτελεί τη γραμμική προσαρμογή που χαρακτηρίζει τα αποτελέσματα του δείγματος δοκιμών.



Σχήμα 2.11: Οι προβλεφθείσες τιμές της ερυθρομετατόπισης z των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης συναρτήσει των αντίστοιχων πραγματικών τιμών των ορθά ταξινομημένων (μπλε αστερίσκοι) και των εσφαλμένα ταξινομημένων (κόκκινοι αστερίσκοι) φασμάτων μέγεθους $G = 20$. Η μαύρη γραμμή υποδεικνύει την ιδανική περίπτωση της ορθής πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, ενώ η μπλε και η κόκκινη γραμμή αποτελούν τις γραμμικές προσαρμογές που χαρακτηρίζουν τους ορθά και τους εσφαλμένα ταξινομημένους γαλαξίες του δείγματος δοκιμών.

Από τη μελέτη του πίνακα 2.5 και των εικόνων 2.6 - 2.11, προκύπτει ότι για το σύνολο των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης του δείγματος δοκιμών, τα σφάλματα στην πρόβλεψη της ερυθρομετατόπισης μειώνονται καθώς το μέγεθος γίνεται λαμπρότερο, κάτι που είναι αναμενόμενο. Οι τιμές των σφαλμάτων αυτών κυμαίνονται από 3.2 % ($G = 15$) έως και 9.0 % ($G = 20$). Η ίδια τάση παρατηρείται ανεξάρτητα του φασματικού τύπου και της ορθότητας ταξινόμησης του φασματικού τύπου. Παρόλα αυτά υπάρχουν διαφορές μεταξύ των φασματικών τύπων ως προς την ικανότητα πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης: Οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και οι σπειροειδείς γαλαξίες χαρακτηρίζονται από χαμηλότερα σφάλματα πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, σε σχέση με τους ανώμαλους γαλαξίες και τους QSFG.

Στον πίνακα 2.5 φαίνεται επίσης πως η πρόβλεψη της ερυθρομετατόπισης των ορθώς ταξινομημένων φασμάτων γαλαξιών είναι κατά 1 % έως 2 % καλύτερη σε σχέση με τα εσφαλμένως ταξινομημένα σφάλματα γαλαξιών. Επίσης, τα μέσα απόλυτα εκατοστιαία σφάλματα των προβλέψεων της ερυθρομετατόπισης είναι χαμηλότερα για γαλαξίες με $z \leq 0.2$. Συγκεκριμένα, είναι χαμηλότερα κατά 0.1 % για τους ορθώς ταξινομημένους γαλαξίες, κατά 0.2 % για το σύνολο των γαλαξιών και κατά 0.8 % για τους γαλαξίες QSFG με $G = 20$.

Υπενθυμίζεται ότι η πληροφορία για την απορρόφηση που έχει υποστεί κάθε ημι-εμπειρικό φάσμα γαλαξία δεν είναι διαθέσιμη. Όμως το σύστημα UGC είναι σχεδιασμένος με τέτοιον τρόπο, ώστε να πραγματοποιεί την πρόβλεψη της απορρόφησης πριν από την πρόβλεψη της ερυθρομετατόπισης, ελαχιστοποιώντας έτσι τα σχετικά σφάλματα. Συνεπώς, τα μέσα εκατοστιαία σφάλματα του πίνακα 2.5 θα πρέπει να θεωρηθούν ως ανώτατα όρια.

2.2 Βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων

2.2.1 Διερεύνηση παραμέτρων συνθετικών φασμάτων

Για την κατασκευή των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί νόμοι αστρικής δημιουργίας: (α) Στην περίπτωση των συνθετικών γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας μειώνεται εκθετικά, ενώ (β) στην περίπτωση των σπειροειδών γαλαξιών, των ανώμαλων γαλαξιών και των QSFG ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας είναι ανάλογος με τη μάζα του αερίου. Οι παραπάνω νόμοι αστρικής δημιουργίας μοντελοποιήθηκαν μέσω της επιλογής διαφόρων συνδυασμών των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας και συγκεκριμένων τελικών ηλικιών των φασμάτων. Οι παράμετροι για το «εκθετικό» SFR είναι οι p_1 και p_2 , ενώ για το SFR που είναι ανάλογο με τη μάζα του αερίου είναι οι p_1 , p_2 , p_3 και t_{infall} . Θα πρέπει να σημειωθεί πως οι παράμετροι p_1 και p_2 του ενός νόμου αστρικής δημιουργίας δεν αντιστοιχούν στις παραμέτρους p_1 και p_2 του άλλου νόμου. Τέλος, η ηλικία ορίζεται στα 13 Gyr για τους γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και τους σπειροειδείς, και στα 9 Gyr για τους ανώμαλους γαλαξίες και τους QSFG.

Το εύρος των τιμών των παραμέτρων p_1 , p_2 , p_3 και t_{infall} επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργηθούν όσο το δυνατόν περισσότερο ρεαλιστικά συνθετικά φάσματα γαλαξιών (Tsalmantza et al., 2009). Για τους σκοπούς του συστήματος UGC πρέπει τα συνθετικά φάσματα να αποτελούν κατά το δυνατόν τυπικές περιπτώσεις, παραμένοντας ταυτόχρονα ρεαλιστικά. Έτσι, η ταξινόμηση και η παραμετροποίηση των φασμάτων που πρόκειται να παρατηρήσει ο δορυφόρος Gaia θα μπορούν να γίνουν περισσότερο αποτελεσματικά.

Τα χρώματα $(g-r)$ και $(r-i)$ των συνθετικών φασμάτων της συγκεκριμένης βιβλιοθήκης είναι ρεαλιστικά, καθώς καλύπτουν επιτυχώς τα αντίστοιχα χρώματα γαλαξιών παρατηρούμενων από το SDSS(2.40). Για τη δημιουργία των φασμάτων αυτών όμως έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενή εύρη τιμών παραμέτρων, διαφορετικοί νόμοι αστρικής δημιουργίας και διαφορετικές τελικές ηλικίες. Έτσι, τα παραχθέντα συνθετικά φάσματα χαρακτηρίζονται από μία μεγάλη ποικιλομορφία, με πολλά διαφορετικά συνεχή και γραμμές εκπομπής διαφόρων εντάσεων. Επιπροσθέτως, δεν είναι σαφής ο τρόπος με τον οποίο η ταυτόχρονη μεταβολή δύο, τριών ή ακόμα και τεσσάρων παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας καθορίζει τη μορφή του παραχθέντος φάσματος. Οι συνέπειες της παραπάνω πολυπλοκότητας συνοψίζονται στα εξής:

- Διαφορετικοί συνδυασμοί των παραμέτρων του ίδιου νόμου αστρογένεσης δύνανται να αντιστοιχούν σε παρόμοια φάσματα

- Διαφορετικοί συνδυασμοί των παραμέτρων διαφορετικού νόμου αστρογένεσης δύνανται να αντιστοιχούν σε παρόμοια φάσματα
- Συνδυασμοί παραμέτρων δύνανται να αντιστοιχούν σε φάσματα που δεν έχουν τυπική μορφή

Η βελτιστοποίηση της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών ώστε αυτή να καταστεί περισσότερο ρεαλιστική και να χρησιμοποιηθεί από ένα σύστημα όπως το UGC, απαιτεί την πρότερη γνώση του τρόπου με τον οποίο η επιλογή των διαφόρων συνδυασμών των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας καθορίζει τη μορφή του παραχθέντος φάσματος. Η πληροφορία αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση πανομοιότυπων φασμάτων του ίδιου φασματικού τύπου, πανομοιότυπων φασμάτων διαφορετικού φασματικού τύπου και μη αναμενόμενων - μη τυπικών φασμάτων. Η απαλοιφή των φασμάτων αυτών θα μπορούσε να βελτιώσει την ικανότητα του UGC να ταξινομεί και να παραμετροποιεί φάσματα γαλαξιών. Επιπλέον, η σχέση μεταξύ των παραμέτρων εισόδου του κώδικα φασματικής εξέλιξης PÈGASE και των παραχθέντων φασμάτων θα γινόταν περισσότερο κατανοητή, εξασφαλίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο μία πιο παραγωγική μελλοντική χρήση του.

Θα πρέπει φυσικά να επισημανθεί ότι στην πραγματικότητα αναμένονται τόσο φασματικές ομοιότητες μεταξύ φασμάτων διαφορετικού τύπου, όσο και πολύπλοκες περιπτώσεις γαλαξιών, όπως για παράδειγμα γαλαξιακές αλληλεπιδράσεις και συγχωνεύσεις. Οι περιπτώσεις αυτές αναμένεται να δυσχεράνουν την ταξινόμηση και την παραμετροποίηση των γαλαξιών που πρόκειται να παρατηρήσει ο δορυφόρος Gaia. Ένα τόσο δύσκολο έργο όμως, όπως αυτό της φασματικής ταξινόμησης και παραμετροποίησης, θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί καλύτερα αν υπήρχε ένα απλό και ρεαλιστικό σετ συνθετικών πρότυπων φασμάτων γαλαξιών.

Κάθε ένα φάσμα γαλαξία μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σημείο σε έναν χώρο πολλών διαστάσεων, με τόσους άξονες όσους και ο αριθμός των μηκών κύματος για τα οποία είναι γνωστή η ροή τους, όσα δηλαδή και τα pixel τους. Σε κάθε άξονα το φάσμα του κάθε γαλαξία λαμβάνει την τιμή της ροής για το αντίστοιχο μήκος κύματος. Με δεδομένη την αδυναμία να παρασταθούν με γραφικό τρόπο τα φάσματα γαλαξιών ακολουθώντας την παραπάνω θεώρηση, είναι εμφανής η ανάγκη χρησιμοποίησης κατάλληλων μεθόδων που θα μπορούσαν να μειώσουν τις διαστάσεις σε δύο ή τρεις αντιπροσωπευτικές διαστάσεις. Έτσι, η βιβλιοθήκη των φασμάτων γαλαξιών θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο εσοπτείας και ανάλυσης όλων των φασμάτων της ταυτόχρονα. Μία τέτοια κατάλληλη μέθοδος είναι η ανάλυση κυρίων συνιστωσών (principal components analysis - PCA).

Πίνακας 2.6: Το ποσοστό επί της συνολικής διακύμανσης, το αθροιστικό ποσοστό και το σφάλμα ανακατασκευής των πέντε σημαντικότερων ιδιοδιανυσμάτων των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών.

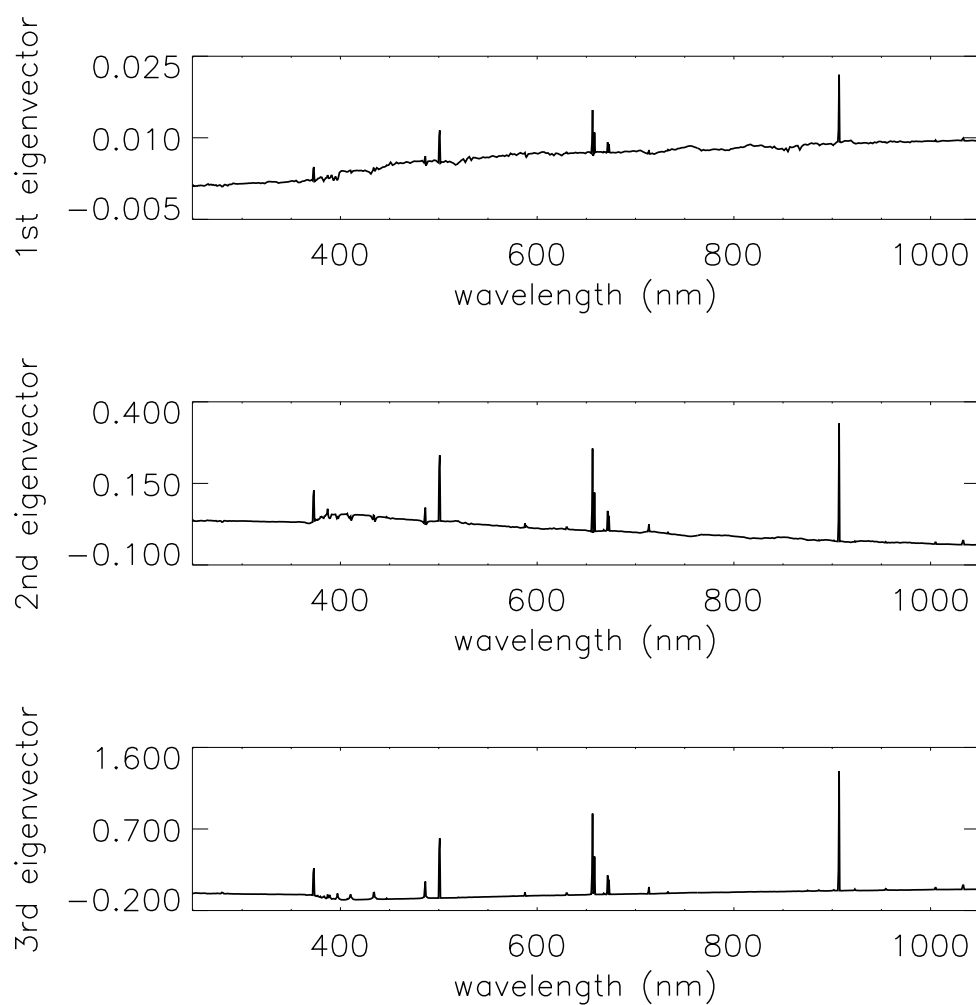
Ιδιοδιάνυσμα	Διακύμανση (% επί του συνόλου)	Αθροιστική διακύμανση (% επί του συνόλου)	Σφάλμα ανακατασκευής (%)
$\vec{u}_1$	94.61	94.61	6.86
$\vec{u}_2$	4.25	98.85	1.87
$\vec{u}_3$	1.05	99.90	0.32
$\vec{u}_4$	0.07	99.98	0.12
$\vec{u}_5$	0.02	99.99	0.07

Εφαρμογή στα συνθετικά φάσματα

Η επεξεργασία των 28 885 συνθετικών φασμάτων γαλαξιών πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή της μεθόδου PCA. Λόγω της ανάγκης διατήρησης της σχετικής έντασης των φασματικών χαρακτηριστικών, έγινε χρήση της μη τυποποιημένης PCA (Steiner et al., 2009). Συνεπώς πραγματοποιήθηκε η κατασκευή του πίνακα διασπορών-συνδιασπορών, στον οποίο τα διαγώνια στοιχεία αντιπροσωπεύουν τη διασπορά κάθε pixel της κανονικοποιημένης ροής και τα μη διαγώνια στοιχεία αντιπροσωπεύουν τη συνδιασπορά μεταξύ αυτών. Σημειώνεται ότι η συνδιασπορά αποτελεί ένα μέτρο γραμμικού συσχετισμού μεταξύ δύο μεταβλητών. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο ισχυρότερη είναι η αλληλοεξάρτηση μεταξύ των μεταβλητών αυτών.

Στον Πίνακα 2.6 είναι καταγεγραμμένα τα ποσοστά της συνολικής διακύμανσης που αντιπροσωπεύουν τα πέντε πρώτα PC, καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά της αθροιστικής διακύμανσης (cumulative variance). Το σχήμα 2.12 δείχνει τα τρία κυριότερα ιδιοδιανύσματα (PC1, PC2 και PC3) των συνθετικών γαλαξιακών φασμάτων. Το πρώτο ιδιοδιάνυσμα είναι ένα «ερυθρό» φάσμα με γραμμές εκπομπής, το οποίο πιθανότατα σχετίζεται με τη λαμπρότητα των συνθετικών φασμάτων. Ο γραμμικός συντελεστής συσχέτισης του Pearson (linear Pearson correlation coefficient) μεταξύ των ολικών ροών των φασμάτων και των συντελεστών πρόσμειξης του PC1 βρίσκεται να είναι ίσος με 0.998. Το δεύτερο και το τρίτο ιδιοδιάνυσμα είναι περισσότερο «κυανά» με σχετικά ισχυρότερες γραμμές εκπομπής. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι οι OII (372.7 nm), OIII (500.7 nm), H α (656.2 nm) και SIII (906.9 nm).

Στον Πίνακα 2.6 καταγράφονται επίσης τα σφάλματα ανακατασκευής που αντιστοιχούν στη χρήση έως και του πέμπτου ιδιοδιανύσματος. Τα παραπάνω είναι οι απόλυτες τιμές των μέσων εκατοστιαίων σφαλμάτων στη συνολική κανονικοποιημένη ροή. Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα των σφαλμάτων



Σχήμα 2.12: Το πρώτο (επάνω), το δεύτερο (κέντρο) και το τρίτο (κάτω) ιδιοδιάνυσμα της βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών, όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου PCA.

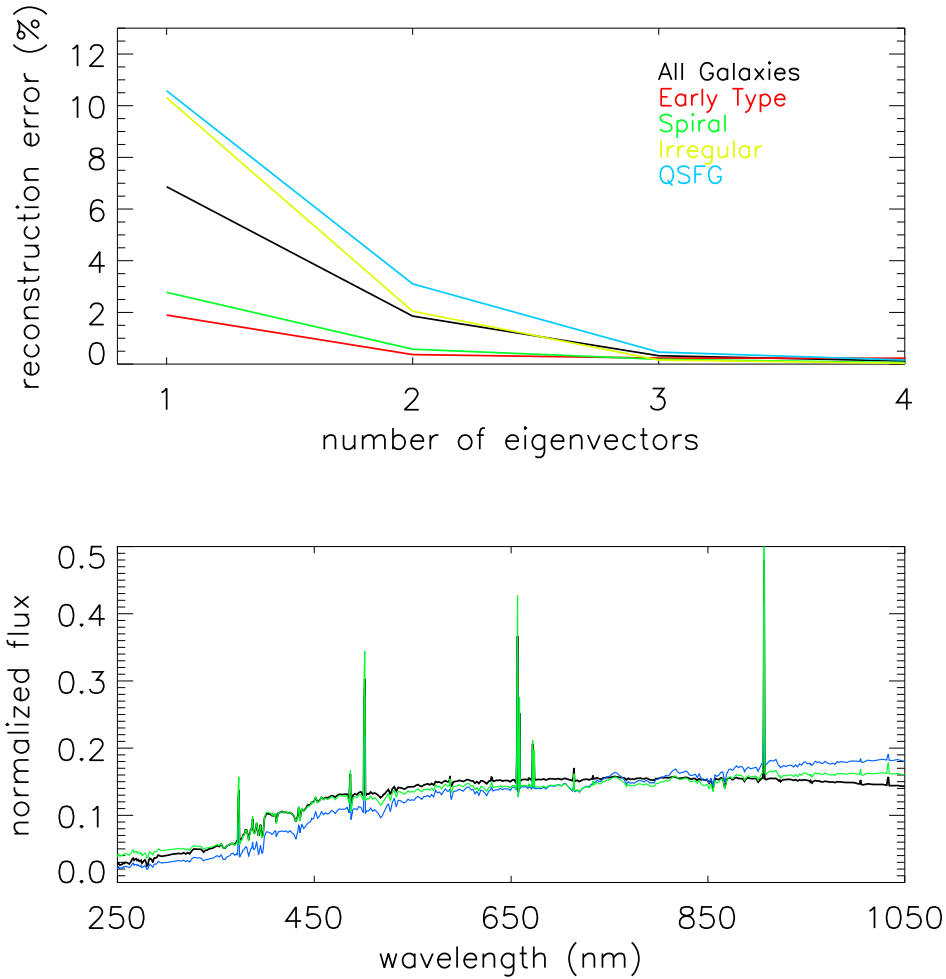
ανακατασκευής που αντιστοιχούν στη χρήση των κυριότερων συνιστωσών, για κάθε φασματικό τύπο. Το ιδιοδιάνυσμα PC1 φαίνεται να ανακατασκευάζει αποτελεσματικότερα τους γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και τους σπειροειδείς γαλαξίες. Αντιθέτως, ο συνυπολογισμός των ιδιοδιανυσμάτων PC2 και PC3, στα οποία οι γραμμές εκπομπής είναι περισσότερο κυρίαρχες (σχήμα 2.12), φαίνεται να επιφέρει τις μεγαλύτερες διορθώσεις στους ανώμαλους γαλαξίες και στους QSGG. Στο ίδιο σχήμα δίνεται και ένα παράδειγμα ανακατασκευής ενός συνθετικού φάσματος γαλαξία, αφενός με τη χρήση της πρώτης κύριας συνιστώσας, αφετέρου με τη χρήση των δύο πρώτων κύριων συνιστωσών.

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι είναι δυνατό να αναλύσουμε με ακρίβεια το σύνολο της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών χρησιμοποιώντας τις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2. Με τα συγκεκριμένα ιδιοδιανύσματα επιτυγχάνεται ένα πολύ χαμηλό μέσο σφάλμα ανακατασκευής (2%), ενώ ταυτόχρονα αντιπροσωπεύεται από αυτά το 99 % της συνολικής διακύμανσης. Έτσι, ο αριθμός των διαστάσεων μειώνεται δραστικά, χωρίς το γεγονός αυτό να συνοδεύεται από σημαντική απώλεια πληροφορίας.

Προκειμένου να διερευνηθεί η ευαισθησία των ιδιοδιανυσμάτων PC1 και PC2 σε σχέση με τα δεδομένα και να εξαχθούν συμπεράσματα για την ευστάθειά τους, διενεργήθηκε η παρακάτω δοκιμασία: Η βιβλιοθήκη των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών μελετήθηκε σε τυχαίως επιλεγμένα επιμέρους δείγματά της, τα οποία αντιστοιχούσαν στο ήμισυ, στο ένα τέταρτο, στο ένα όγδοο και στο ένα δέκατο έκτο του συνόλου των διαθέσιμων φασμάτων. Για κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες δειγματοληψίας η τυχαία επιλογή φασμάτων πραγματοποιήθηκε δέκα φορές και εφαρμόστηκε η μέθοδος PCA. Τέλος, υπολογίστηκε το μερίδιο των εξαχθέντων ιδιοδιανυσμάτων PC1 και PC2 στη συνολική διακύμανση του κάθε δείγματος φασμάτων, με αποτέλεσμα να προκύψουν η σχετικές μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις για κάθε μία από τις τέσσερις κατηγορίες δειγματοληψίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.7. Όπως γίνεται φανερό, τα δύο σημαντικότερα ιδιοδιανύσματα παραμένουν πρακτικώς αμετάβλητα.

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η ευστάθεια των δύο κυριότερων ιδιοδιανυσμάτων σε σχέση με το φασματικό τύπο. Η μέθοδος PCA εφαρμόστηκε στα συνθετικά φάσματα κάθε τύπου ξεχωριστά και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 2.14. Το PC1 είναι διαφορετικό για κάθε περίπτωση. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, επειδή το PC1, συσχετιζόμενο με το μεγαλύτερο μερίδιο της διακύμανσης, αντικατοπτρίζει τις κυριότερες διαφορές μεταξύ των φασμάτων των διαφορετικών φασματικών τύπων (Ronen et al., 1999). Το PC2 παραμένει πρακτικώς αμετάβλητο.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η ύπαρξη έντονων γραμμών απορρόφησης στο PC1 των σπειροειδών γαλαξιών δεν υποδηλώνει απαραίτητα κάτι το διαφορετικό



Σχήμα 2.13: Επάνω: Το σφάλμα ανακατασκευής για το σύνολο και τους επιμέρους φασματικούς τύπους των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. Το διάγραμμα παρουσιάζει τη συνεισφορά έως και του τέταρτου ιδιοδιανύσματος, στον οποίο το σφάλμα ανακατασκευής πρακτικά μηδενίζεται για όλους τους φασματικούς τύπους. Κάτω: Ένα παράδειγμα ανακατασκευής ενός συνθετικού φάσματος γαλαξία (μαύρο), με τη χρήση του πρώτου (μπλε) και των δύο πρώτων (πράσινο) κυρίων συνιστωσών.

Πίνακας 2.7: Το ποσοστό επί της συνολικής διακύμανσης των δύο σημαντικότερων ιδιοδιανυσμάτων για τυχαίως επιλεγμένα επιμέρους δείγματα της φασματικής βιβλιοθήκης. Η εφαρμογή της μεθόδου PCA έλαβε χώρα δέκα φορές για κάθε επιμέρους δείγμα.

Επιμέρους δείγμα	Διακύμανση του $\vec{u}_1$ (% επί του συνόλου)	Διακύμανση του $\vec{u}_2$ (% επί του συνόλου)
	Μέση τιμή / τυπική απόκλιση	Μέση τιμή / τυπική απόκλιση
1/2	94.62 / 0.03	4.24 / 0.04
1/4	94.62 / 0.07	4.25 / 0.07
1/8	94.66 / 0.11	4.20 / 0.09
1/16	94.65 / 0.16	4.22 / 0.13

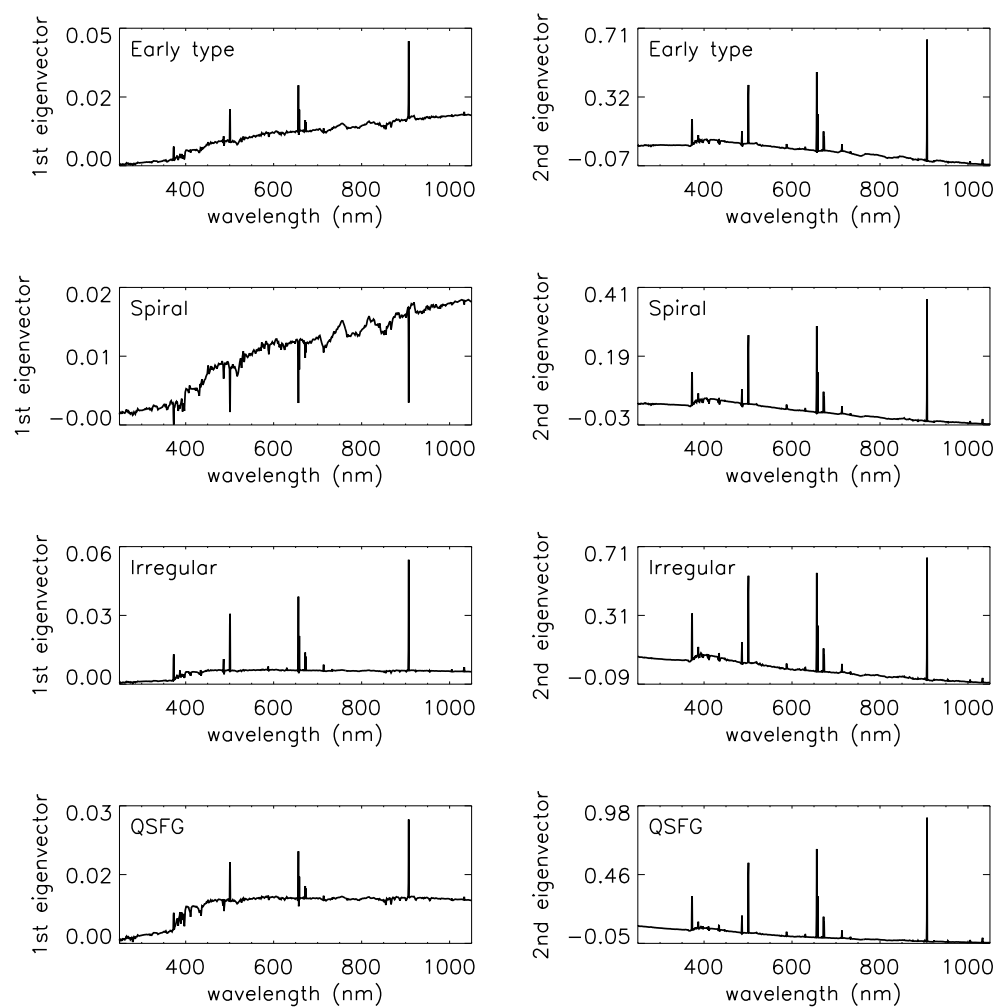
σε σχέση με τις γραμμές εκπομπής που εμφανίζονται στα PC1 των υπολοίπων φασματικών τύπων, επειδή το πρόσημο είναι αυθαίρετο. Αντιθέτως, οι τέσσερις φασματικοί τύποι είναι όμοιοι μεταξύ τους σε σχέση με την ύπαρξη γραμμών εκπομπής/απορρόφησης, επειδή παρουσιάζουν το ίδιο σχετικό πρόσημο.

Προβολή των φασμάτων στους PCs

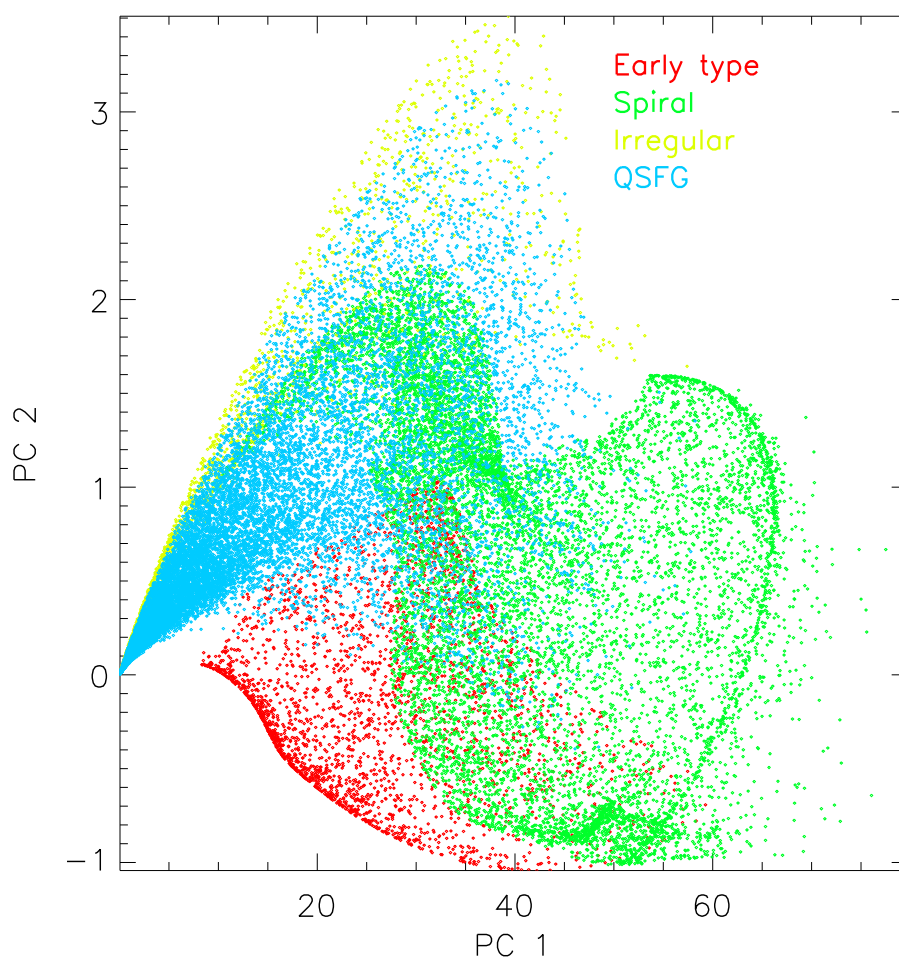
Η προβολή των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 φαίνεται στο σχήμα 2.15 (Karampelas et al., 2012), καθώς και στο σχήμα 2.16 για κάθε φασματικό τύπο ξεχωριστά. Η τρισδιάστατη προβολή των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στις συνιστώσες PC1, PC2 και PC3, παρουσιάζεται στο Παράρτημα Γ. Η αναπαράσταση των φασμάτων στις συνιστώσες αυτές επιτρέπει τη διερεύνηση α) της ύπαρξης αλληλεπικαλύψεων μεταξύ των διαφορετικών φασματικών τύπων, και β) των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας που προκαλούν τις αλληλεπικαλύψεις αυτές.

Η παραπάνω διερεύνηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη βελτιστοποίηση της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. Η βελτιστοποίηση αυτή θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί διαμέσου μίας κατάλληλης προσαρμογής του εύρους των τιμών των παραμέτρων, η οποία θα μπορούσε να συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της μοντελοποίησης του κώδικα PÉGASE.2 και συνεπώς να καθορίσει το πλαίσιο της μελλοντικής χρήσης του. Παρόλα αυτά, υπενθυμίζεται πως η βελτιστοποίηση της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων με τη βοήθεια της μεθόδου PCA θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε τα τελικά βέλτιστα φάσματα γαλαξιών να είναι ταυτόχρονα και όσο το δυνατόν περισσότερα ρεαλιστικά.

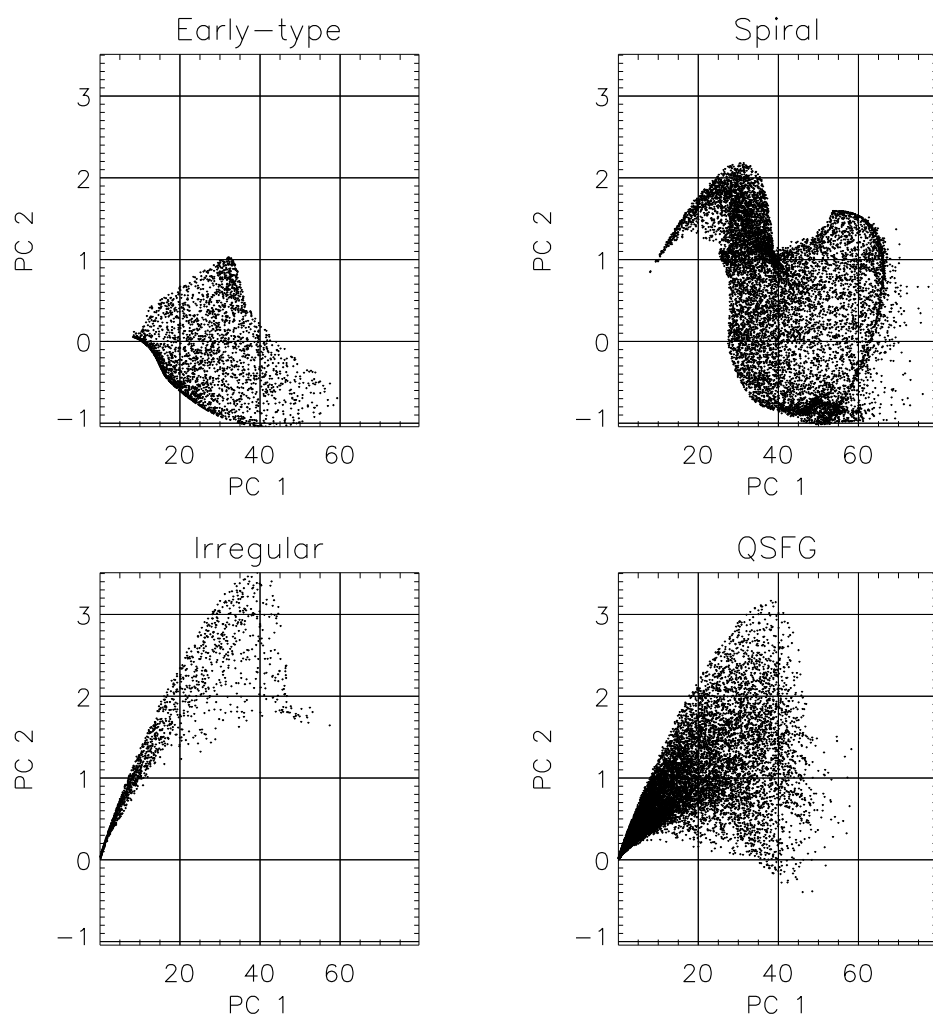
Όπως φαίνεται στις εικόνες 2.15 και 2.16, οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου βρίσκονται στο κατώτερο τμήμα του διαγράμματος, όπου η συνιστώσα PC2, το χαρακτηριστικό της οποίας είναι οι έντονες γραμμές εκπο-



Σχήμα 2.14: Τα δύο σημαντικότερα ιδιοδιανύσματα, όταν η μέθοδος PCA εφαρμόζεται στα συνθετικά φάσματα κάθε φασματικού τύπου ξεχωριστά.



Σχήμα 2.15: Προβολή των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών (Tsalmantza et al., 2009) στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 όλων των φασματικών τύπων ταυτόχρονα.



Σχήμα 2.16: Προβολή των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών (Tsalmantza et al., 2009) στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 για κάθε φασματικό τύπο.

μπής, είναι λιγότερο ισχυρή. Η πλειοψηφία των γαλαξιών αυτών χαρακτηρίζεται από αρνητικές τιμές της συνιστώσας PC2, γεγονός το οποίο δηλώνει πως η συνεισφορά της συνιστώσας αυτής είναι κυρίως να εξασθενεί τη συνεισφορά της συνιστώσας PC1 σε ό,τι αφορά την ένταση των γραμμών εκπομπής. Αντιθέτως, οι ανώμαλοι γαλαξίες και οι QSFG τείνουν να κατανέμονται στο άνω αριστερά τμήμα του διαγράμματος, όπου η συνιστώσα PC2 είναι πιο σημαντική από ότι στην περίπτωση των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου. Τέλος, οι σπειροειδείς γαλαξίες παρουσιάζουν μία ευρύτερη ποικιλία στους συνδυασμούς των συνιστωσών PC1 και PC2.

Ο παραπάνω διαχωρισμός των διαφόρων φασματικών τύπων, καθώς και η ύπαρξη αλληλεπικαλύψεων μεταξύ τους, είναι έως ένα βαθμό αναμενόμενα. Από τη μελέτη όμως των εικόνων 2.15 και 2.16 γίνεται φανερό πως οι αλληλεπικαλύψεις αυτές αρκετά εκτεταμένες. Οι σπειροειδείς γαλαξίες αλληλεπικαλύπτονται ισχυρώς με τους γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και τους QSFG, ενώ οι τελευταίοι αλληλεπικαλύπτονται ισχυρώς με τους ανώμαλους γαλαξίες. Λιγότερο εκτενείς αλληλεπικαλύψεις διαπιστώνονται μεταξύ σπειροειδών και ανώμαλων γαλαξιών, καθώς και μεταξύ γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου και QSFG. Από την άλλη μεριά, δεν υπάρχει αλληλεπικάλυψη μεταξύ γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου και ανώμαλων.

2.2.2 Επιμέρους διερεύνηση των φασματικών τύπων

Τα παραπάνω ευρήματα θα μπορούσαν πιθανότητα να ερμηνεύσουν την απόδοση ταξινόμησης του συστήματος UGC, όπως αυτή υπολογίζεται από τις δοκιμασίες στις οποίες υποβάλλεται ο αλγόριθμος με τη χρήση των προσομοιωμένων συνθετικών φασμάτων. Για παράδειγμα, τα περισσότερα από τα φάσματα γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου για τα οποία η ταξινόμηση είναι λανθασμένη, ταξινομούνται ως φάσματα σπειροειδών γαλαξιών. Επίσης, κανένας γαλαξίας προγενέστερου φασματικού τύπου δεν ταξινομείται λανθασμένα ως ανώματος γαλαξίας. Είναι λοιπόν φανερό πως μία βελτιστοποιημένη εκδοχή της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών, η οποία θα χαρακτηριζόταν από λιγότερες αλληλεπικαλύψεις μεταξύ των διαφόρων φασματικών τύπων, θα μπορούσε να βελτιώσει την ικανότητα του UGC να ταξινομεί και να παραμετροποιεί φάσματα γαλαξιών.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου PCA στα συνθετικά φάσματα κάθε φασματικού τύπου και η συνεπακόλουθη ανάλυσή τους.

Γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου

Για τη δημιουργία των συνθετικών φασμάτων των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου έχει γίνει χρήση ενός «εκθετικού» νόμου αστρικής δημιουργίας (Star Formation Law - SFL) με ρυθμό αστρικής δημιουργίας (Star Formation Rate - SFR)

$$SFR(t) = \frac{p_2}{p_1} \cdot e^{-\frac{t}{p_1}} \quad (2.2.1)$$

όπου p_1 και p_2 οι παράμετροι του ρυθμού αστρικής δημιουργίας (SFR parameters) και ηλικία των συνθετικών γαλαξιών ίση με 13 Gyr. Η κανονικοποιημένη διαθέσιμη μάζα για τη δημιουργία αστερών είναι ίση με μία ηλιακή μάζα ($1 M_{\odot}$).

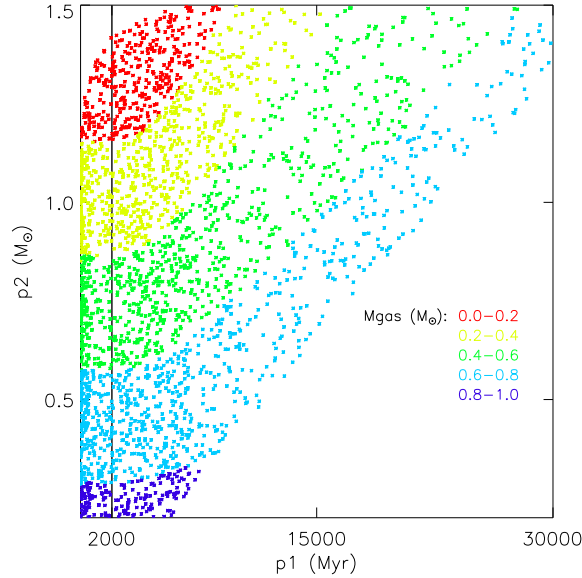
Ο συγκεκριμένος νόμος της αστρικής δημιουργίας χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία συνθετικών φασμάτων γαλαξιών οι οποίοι είχαν μία πολύ έντονη δραστηριότητα αστρογέννησης κατά την πρώιμη εξελικτική τους φάση, ενώ επί του παρόντος, στην ηλικία των 13 Gyr, η αστρική δημιουργία θα πρέπει πρακτικά να έχει σταματήσει. Θα ήταν λοιπόν επιθυμητό για την αστρική δημιουργία των συγκεκριμένων γαλαξιών να είναι έντονη αρχικά και ταχέως φθίνουσα στη συνέχεια.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο σκοπός ήταν να δημιουργηθούν φάσματα τυπικών ερυθρών γαλαξιών και όχι φάσματα ελλειπτικών γαλαξιών οι οποίοι συνεχίζουν στο παρόν να δημιουργούν νέα άστρα με χαμηλό ρυθμό, ή ελλειπτικών που αλληλεπιδρούν με άλλους γαλαξίες και εμπλουτίζονται με αέριο, προκαλώντας νέες αστρογεννήσεις.

Από τη μελέτη των παραμέτρων p_1 και p_2 των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου προκύπτει πως κάποιοι συνδυασμοί τιμών των παραμέτρων αυτών αντιστοιχούν σε

- αστρογέννηση μακράς διαρκείας (υψηλές τιμές της παραμέτρου p_1)
- εξαιρετικά ασθενή ρυθμό αστρογέννησης από την πρώιμη ακόμα εξελικτική φάση του γαλαξία (χαμηλές τιμές του λόγου p_2/p_1).

Στην πρώτη περίπτωση, η πρόσφατη αστρογέννηση είναι σχετικά υψηλή λόγω της βραδείας μείωσης του εκθετικά φθίνοντα ρυθμού αστρικής δημιουργίας. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση γραμμών εκπομπής στα αντίστοιχα φάσματα (Karampelas et al., 2010). Στη δεύτερη περίπτωση λαμβάνει χώρα ένα εξαιρετικά απίθανο σενάριο αστρογέννησης, με το ρυθμό αστρικής δημιουργίας να είναι εξ αρχής πολύ χαμηλός και να μειώνεται ταχέως.



Σχήμα 2.17: Η κατανομή των συνδυασμών των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_1 και p_2 των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου, σε σχέση με την κανονικοποιημένη ποσότητα αερίου που διαθέτουν. Στα αριστερά της έντονης μαύρης γραμμής βρίσκονται τα φάσματα που δεν έχουν γραμμές εκπομπής.

Το γεγονός αυτό γίνεται φανερό και στο σχήμα 2.17, όπου παρουσιάζεται η κατανομή των συνδυασμών των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_1 και p_2 των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου, σε σχέση με την κανονικοποιημένη ποσότητα αερίου που διαθέτουν.

Στο σχήμα 2.18 φαίνεται η επίδραση της επιλογής των διαφόρων συνδυασμών των παραμέτρων p_1 και p_2 στο ρυθμό αστρικής δημιουργίας, στη μορφή των φασμάτων και στα αντίστοιχα χρώματά τους. Οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, σύμφωνα με τα προαναφερθέντα ευρήματα. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής: 1) φάσματα χωρίς γραμμές εκπομπής, 2) φάσματα χωρίς γραμμές εκπομπής με χαμηλό ρυθμό αστρικής δημιουργίας, και 3) φάσματα με γραμμές εκπομπής.

Τα φάσματα της πρώτης κατηγορίας ορίζονται από τις συνθήκες $p_1 < 2000 \text{ Myr}$ και $p_2 > 0.5 M_\odot$ και παρουσιάζονται στην πρώτη στήλη του σχήματος 2.18. Πρόκειται για τα φάσματα προγενέστερου φασματικού τύπου με τις επιθυμητές ιδιότητες σε σχέση με το ρυθμό της αστρικής τους δημιουργίας και τη μορφή τους. Επιπλέον, τα χρώματά τους δεν αλληλεπικαλύπτονται σχεδόν καθόλου με τα χρώματα των σπειροειδών συνθετικών γαλαξιών.

Τα φάσματα της δεύτερης κατηγορίας ορίζονται από τις συνθήκες $p_1 < 2000 \text{ Myr}$ και $p_2 < 0.5 M_\odot$ και παρουσιάζονται στη δεύτερη στήλη του σχήματος 2.18). Τα φάσματα αυτά χαρακτηρίζονται, όπως προαναφέρθηκε, από εξαιρετικά ασθενή αστρογέννεση, ενώ τα χρώματά τους παρουσιάζουν μία αξιοσημείωτη αλληλεπικάλυψη με τα χρώματα των σπειροειδών συνθετικών γαλαξιών.

Τα φάσματα της τρίτης κατηγορίας ορίζονται από τη συνθήκη $p_1 > 2000 \text{ Myr}$ και παρουσιάζονται στην τρίτη στήλη του σχήματος 2.18). Τα φάσματα αυτά αντιστοιχούν, όπως προαναφέρθηκε, σε έντονη και διαρκή αστρογέννεση και χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη έντονων γραμμών εκπομπής. Τα χρώματά τους μάλιστα αλληλεπικαλύπτονται ισχυρά με αυτά των σπειροειδών συνθετικών γαλαξιών.

Οι παραπάνω συνθήκες για τις τιμές των παραμέτρων p_1 και p_2 προσδιορίστηκαν τόσο από τη διερεύνηση αυτών καθεαυτών των φασμάτων προγενέστερου φασματικού τύπου, όσο και από την κατανομή των χρωμάτων τους στο διάγραμμα δύο χρωμάτων.

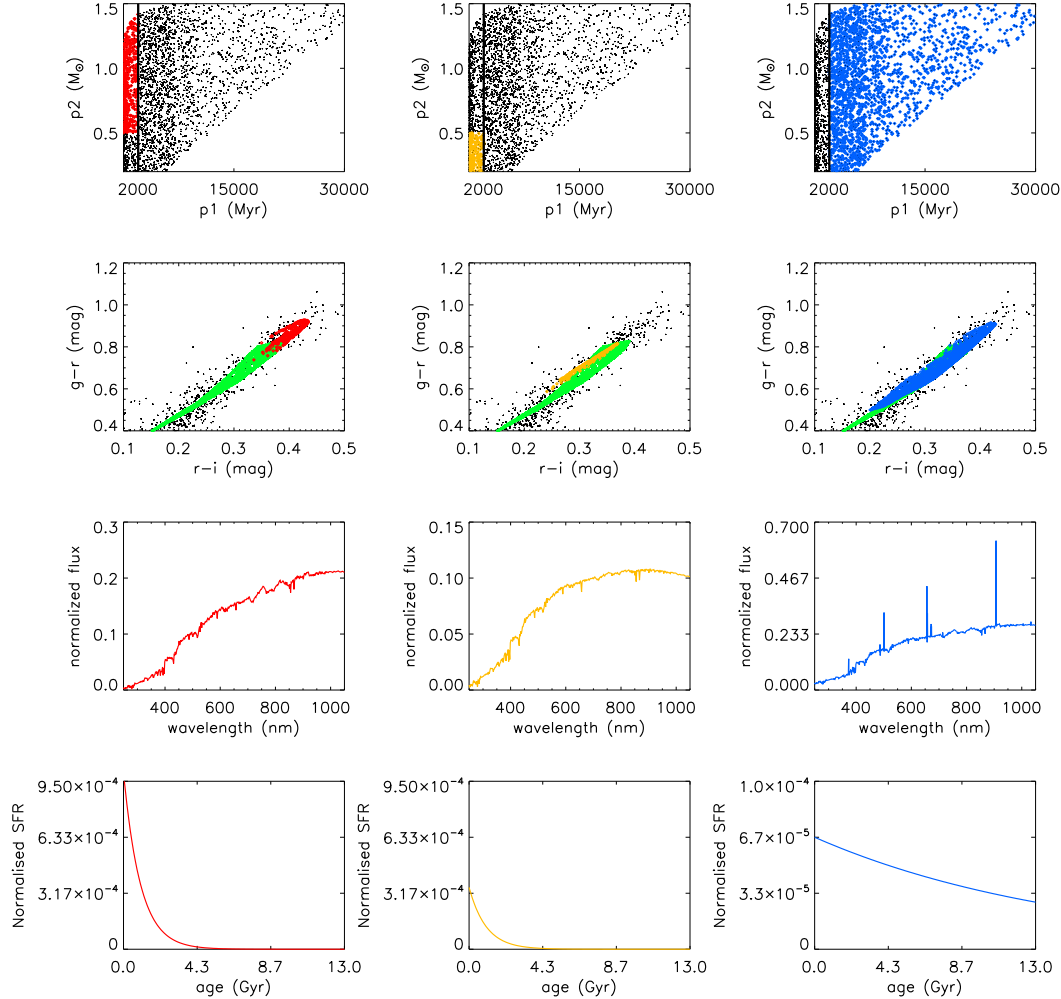
Τα ευρήματα από την εφαρμογή της μεθόδου PCA έρχονται σε συμφωνία με τα παραπάνω, καθώς αποκαλύπτουν μία εκτεταμένη αλληλεπικάλυψη μεταξύ των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου και των σπειροειδών γαλαξιών, καθώς και μία λιγότερο εκτεταμένη αλληλεπικάλυψη μεταξύ των πρώτων και των QSFG (εικόνες 2.15 και 2.16). Στο σχήμα 2.19 φαίνεται η κατανομή των συνθετικών γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2, σύμφωνα με τις τρεις υπό μελέτη κατηγορίες φασμάτων.

Με βάση την ανωτέρω ανάλυση, περικλύονται από τη βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων γαλαξιών τα φάσματα προγενέστερου φασματικού τύπου με $p_1 > 2000 \text{ Myr}$ και $p_2 < 0.5 M_\odot$. Τα φάσματα αυτά ανήκουν στη δεύτερη και στην τρίτη κατηγορία μελέτης, με κύρια χαρακτηριστικά είτε την ύπαρξη γραμμών εκπομπής είτε τη χρήση ενός εξαιρετικά ασθενούς ρυθμού αστρογέννεσης. Τα φάσματα που απομένουν είναι τα επιθυμητά τυπικά ερυθρά φάσματα προγενέστερου φασματικού τύπου. Τόσο τα επιλεγμένα-βέλτιστα φάσματα, όσο και τα περικυκλωμένα, παρουσιάζονται εποπτικά στο σχήμα 2.20.

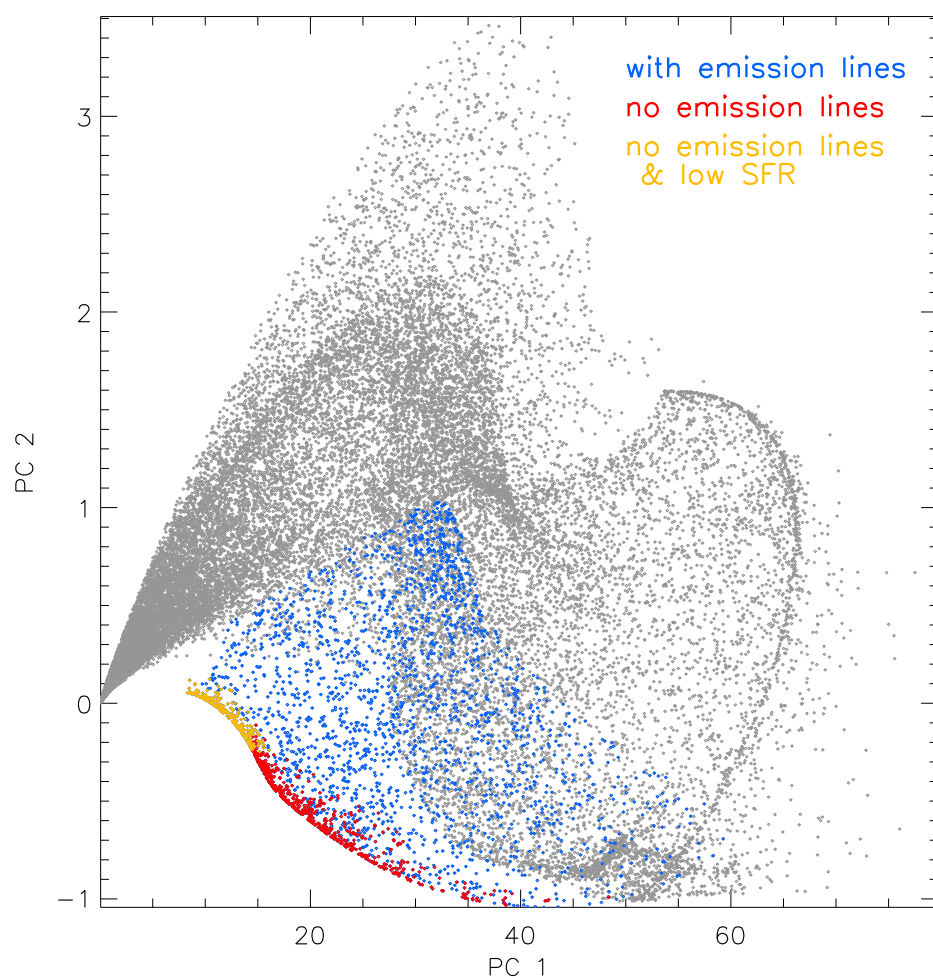
Κατά τη βελτιστοποίηση των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου, η μέθοδος PCA χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά της διερεύνησης του ρυθμού αστρικής δημιουργίας. Εν τούτοις, η μελέτη των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ιδιαίτερης σημασίας, καθώς μέσω αυτής μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο οι τιμές των παραμέτρων p_1 και p_2 διαμορφώνουν το τελικό φάσμα. Η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_1 και p_2 στην κατανομή των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου στους άξονες PC1 και PC2 παρουσιάζεται στο σχήμα 2.21. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται να

συμπληρώσουν τα ευρήματα που οδήγησαν στη βελτιστοποίηση των συνθετικών φασμάτων προγενέστερου φασματικού τύπου. Επιπλέον, είναι αξιοσημείωτος ο διακριτός τρόπος με τον οποίο οι παράμετροι του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_1 και p_2 επιδρούν στο τελικό φάσμα. Η διαπίστωση αυτή είναι πολύ χρήσιμη τόσο για τη μελλοντική χρήση του κώδικα PÉGASE, όπου θα μπορούν να δημιουργηθούν με μεγαλύτερη ευκολία επιθυμητά φάσματα, όσο και για τις ανάγκες του συστήματος UGC, ο οποίος καλείται να εκτιμήσει τις τιμές των παραμέτρων αυτών.

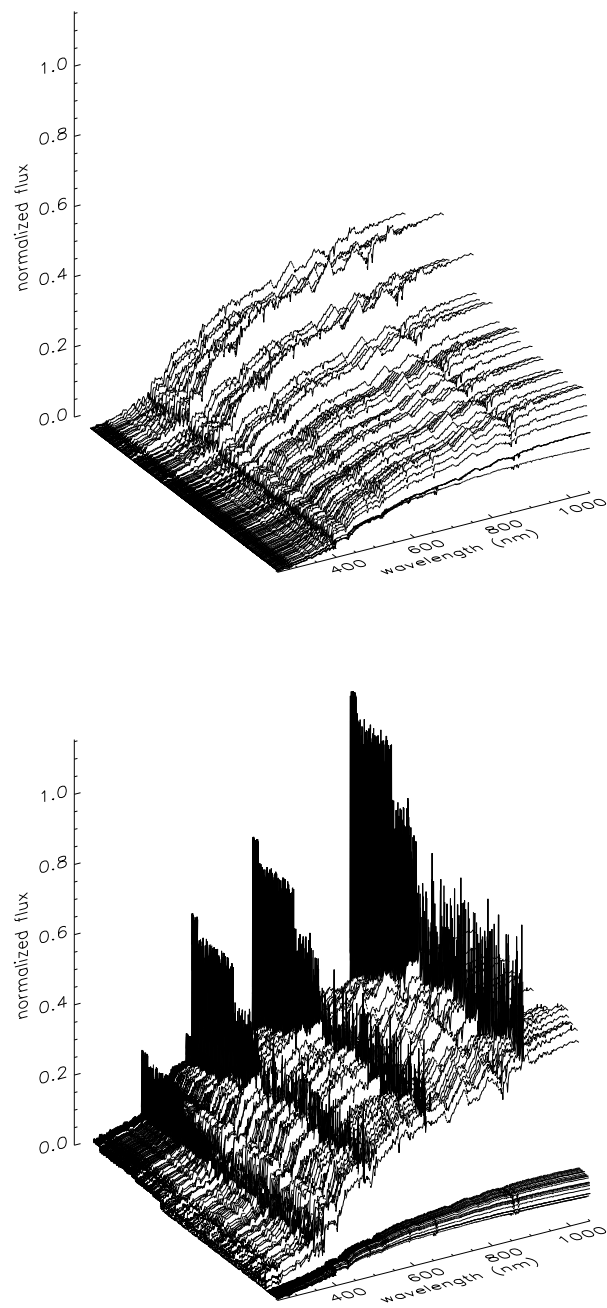
Τέλος, τα συνθετικά φάσματα προγενέστερου φασματικού τύπου απεικονίζονται στο σχήμα 2.22, όπου ο αρχικός ρυθμός αστρικής δημιουργίας ($SFR(t = 0) = p_2/p_1$) συσχετίζεται με τον χρόνο στον οποίο ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας είναι e φορές μικρότερος του αρχικού ($SFR(t = p_1) = SFR(t = 0) \cdot e^{-1}$), όπως προκύπτει και από τον αντίστοιχο τύπο. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι τα βέλτιστα φάσματα αντιστοιχούν πράγματι σε έντονη αρχικά και ταχέως φθίνουσα αστρική δημιουργία, η οποία έχει ήδη μειωθεί κατά e φορές στα πρώτα δύο Gyr της ζωής του συνθετικού γαλαξία, κατά μέγιστο.



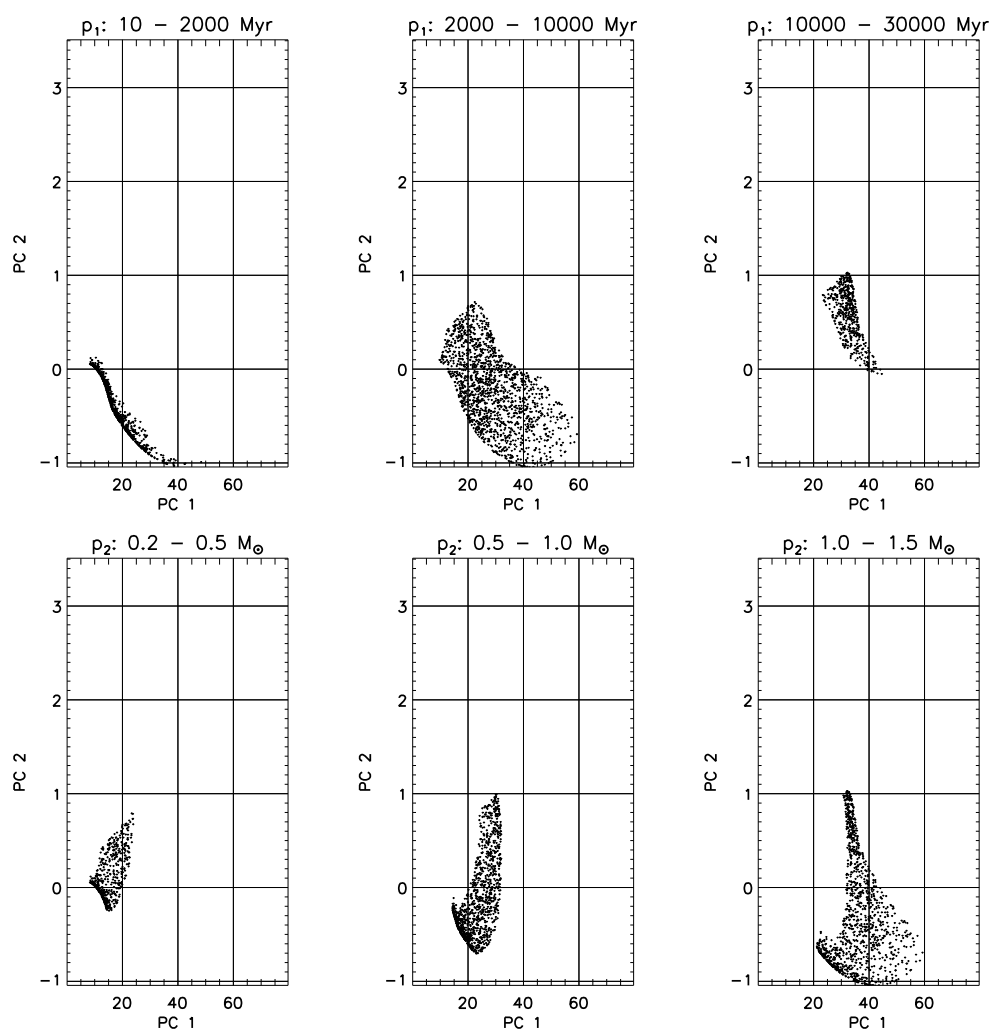
Σχήμα 2.18: Διερεύνηση των ιδιοτήτων των συνθετικών φασμάτων προγενέστερου φασματικού τύπου, ανάλογα με την ύπαρξη ή μη γραμμών εκπομπής και την ένταση της αστρογέννεσης. Πρώτη σειρά: Το διάγραμμα $p_1 - p_2$ των αντίστοιχων παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας για κάθε επιλεγμένη ομάδα φασμάτων. Στα αριστερά της έντονης μαύρης γραμμής βρίσκονται τα φάσματα που δεν έχουν γραμμές εκπομπής. Δεύτερη σειρά: Τα αντίστοιχα διαγράμματα δύο χρωμάτων $(g-r) - (r-i)$ των φασμάτων αυτών, των φασμάτων του SDSS και των συνθετικών σπειροειδών γαλαξιών (πράσινο). Τρίτη σειρά: Τα αντίστοιχα μέσα φάσματα. Τέταρτη σειρά: Παραδείγματα της χρονικής εξέλιξης του κανονικοποιημένου ρυθμού αστρικής δημιουργίας για ένα γαλαξία από κάθε επιλεγμένη ομάδα.



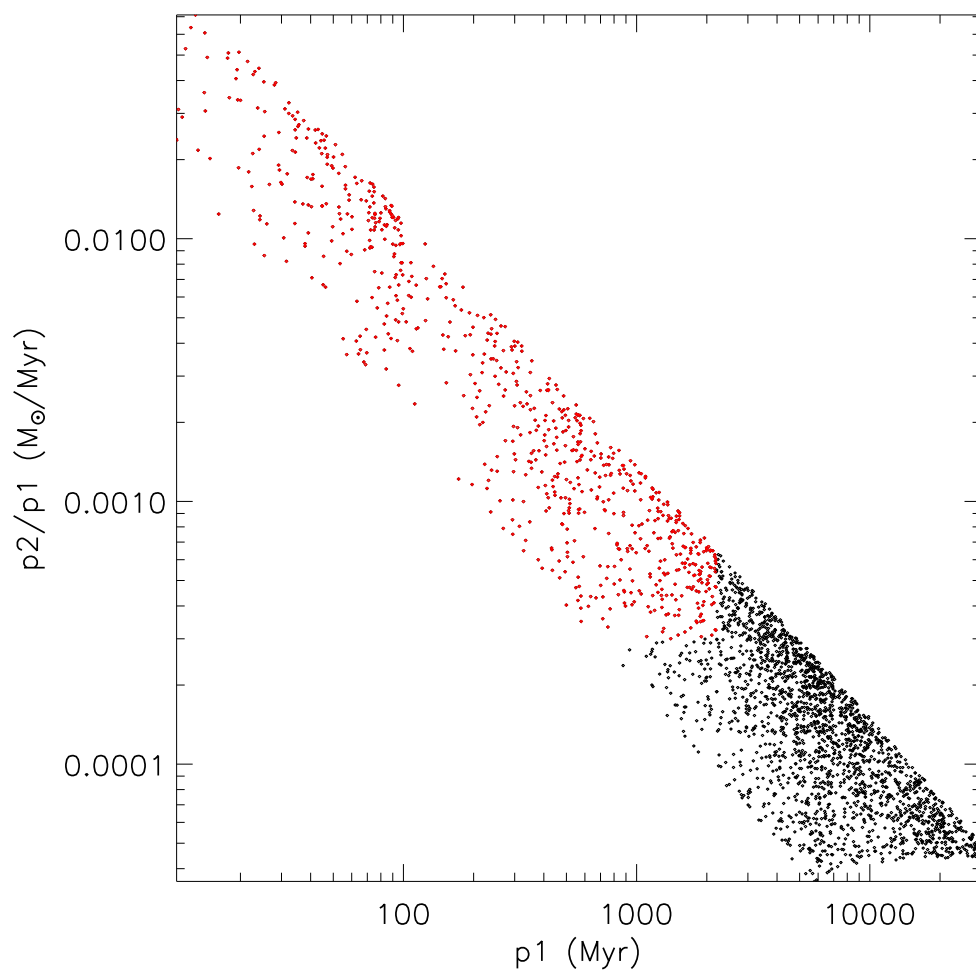
Σχήμα 2.19: Προβολή των συνθετικών φασμάτων προγενέστερου φασματικού τύπου στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2, για κάθε μία από τις τρεις υπό μελέτη κατηγορίες: Φάσματα με γραμμές εκπομπής (μπλε), χωρίς γραμμές εκπομπής (κόκκινο) και χωρίς γραμμές εκπομπής με χαμηλό ρυθμό αστρικής δημιουργίας (πορτοκαλί).



Σχήμα 2.20: Εποπτική παράθεση των βέλτιστων (πάνω) και των περικομμένων (κάτω) συνθετικών φασμάτων γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου.



Σχήμα 2.21: Προβολή των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 για διάφορα εύρη των παραμέτρων p_1 (πρώτη σειρά) και p_2 (δεύτερη σειρά).



Σχήμα 2.22: Απεικόνιση της αρχικού ρυθμού αστρικής δημιουργίας των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου (p_2/p_1) συναρτήσει του χρόνου στον οποίο ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας είναι e φορές μικρότερος του αρχικού, σε λογαριθμική κλίμακα. Τα κόκκινα σημεία αντιστοιχούν στα βέλτιστα φάσματα.

Σπειροειδείς γαλαξίες

Για τη δημιουργία των συνθετικών φασμάτων των σπειροειδών γαλαξιών έχει γίνει χρήση ενός νόμου αστρικής δημιουργίας στον οποίο ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας σε κάθε χρονική στιγμή t είναι ανάλογος της μάζας του αερίου $M_{gas}(t)$ τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η μορφή του ρυθμού αστρογέννησης είναι:

$$SFR(t) = \frac{1}{p_2} \cdot M_{gas}(t)^{p_1}. \quad (2.2.2)$$

Τη χρονική στιγμή $t = 0$ θεωρείται ότι ο γαλαξίας δεν έχει μάζα και ξεκινά να σχηματίζεται με συσσώρευση αερίου, του οποίου η κανονικοποιημένη μάζα είναι ίση με μία ηλιακή μάζα ($1 M_{\odot}$).

Ο ρυθμός συσσώρευσης AR (accretion rate) είναι

$$AR(t) = \frac{e^{-t/t_{infall}}}{t_{infall}}. \quad (2.2.3)$$

Τα επιμέρους συνθετικά φάσματα του συγκεκριμένου φασματικού τύπου δημιουργήθηκαν μεταβάλλοντας τις παραμέτρους του ρυθμού αστρογέννησης p_1 , p_2 και t_{infall} και θεωρώντας ως ηλικία του κάθε γαλαξία τα 13 Gyr. Η επίδραση των παραπάνω μεταβολών στο ρυθμό αστρικής δημιουργίας μελετήθηκε για διάφορες τιμές της κάθε μίας από τις τρεις παραμέτρους αστρικής δημιουργίας, διατηρώντας τις άλλες δύο σταθερές. Σε κάθε περίπτωση εκτελούνταν ο κώδικας PEGASE.2 και καταγράφονταν οι τιμές του ρυθμού αστρικής δημιουργίας σε σχέση με το χρόνο. Η διαδικασία επαναλήφθηκε εκ περιτροπής και για τις άλλες δύο παραμέτρους, με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στις εικόνες 2.23, 2.24 και 2.25. Όπως είναι φανερό, ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας των συνθετικών σπειροειδών γαλαξιών αρχικά αυξάνεται έως ότου φτάσει σε μία μέγιστη τιμή, και στη συνέχεια μειώνεται.

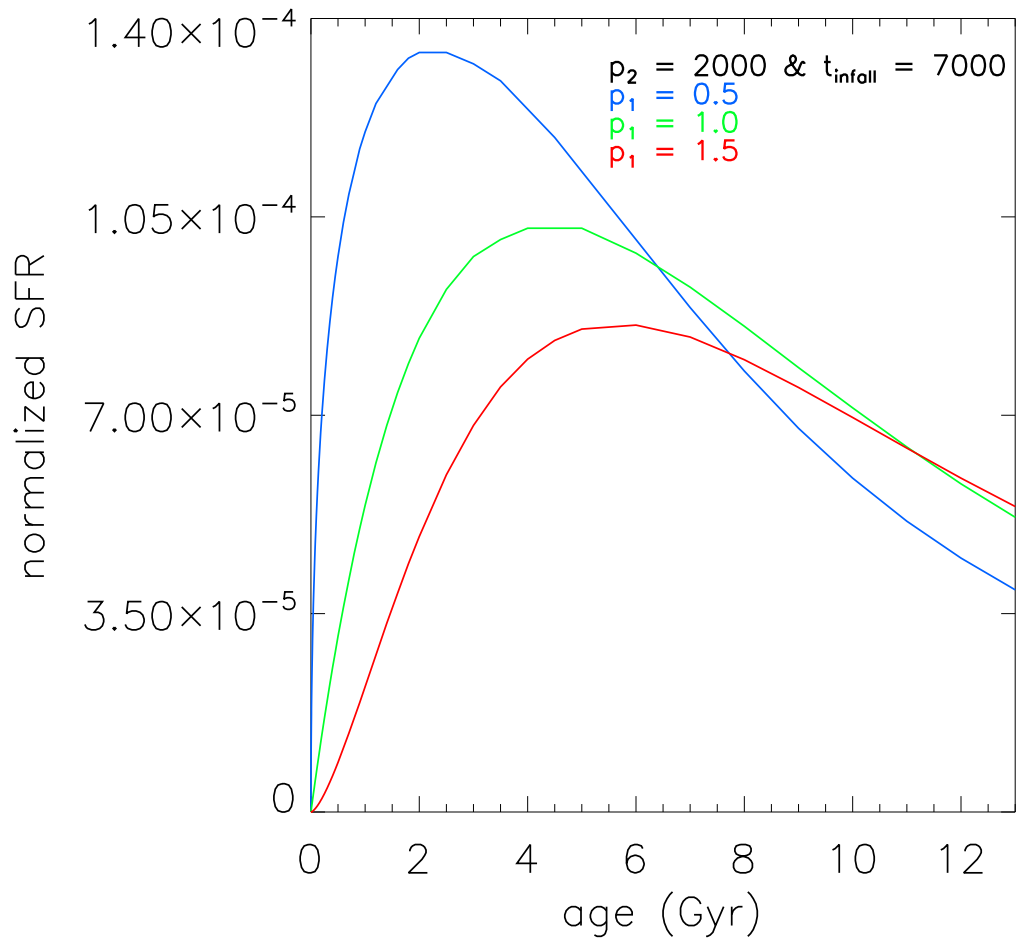
Πράγματι, κατά το συνθετικό σενάριο αστρικής δημιουργίας των γαλαξιών αυτών, το διαθέσιμο αέριο για τη δημιουργία άστρων είναι αρχικά λιγοστό. Κατά συνέπεια, ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας, όντας ανάλογος με τη μάζα του αερίου, είναι επίσης αρχικά χαμηλός. Στη συνέχεια όμως αυξάνεται, καθώς στη διαθέσιμη για αστρογέννηση μάζα του αερίου συμπεριλαμβάνονται, πέραν εκείνης που συσσωρεύεται συνεχώς στο γαλαξία, και η μη χρησιμοποιημένη και εκείνη που προκύπτει από το θάνατο των ταχέως εξελισσόμενων αστέρων υψηλής μάζας. Τέλος, και καθώς το αέριο που συσσωρεύεται στο γαλαξία μειώνεται εκθετικά, η διαθέσιμη για αστρογέννηση μάζα του αερίου επίσης μειώνεται, προκαλώντας το αντίστοιχο αποτέλεσμα και στο ρυθμό αστρικής δημιουργίας. Οι τιμές των παραμέτρων p_1 , p_2 και t_{infall} ρυθμίζουν λοιπόν τα εξής:

- Τη μέγιστη τιμή του ρυθμού αστρικής δημιουργίας (απόδοση της αστρικής δημιουργίας - efficiency of star formation)
- Τη χρονική στιγμή κατά την οποία μεγιστοποιείται ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας (χρονική κλίμακα της αστρικής δημιουργίας - timescale of star formation)

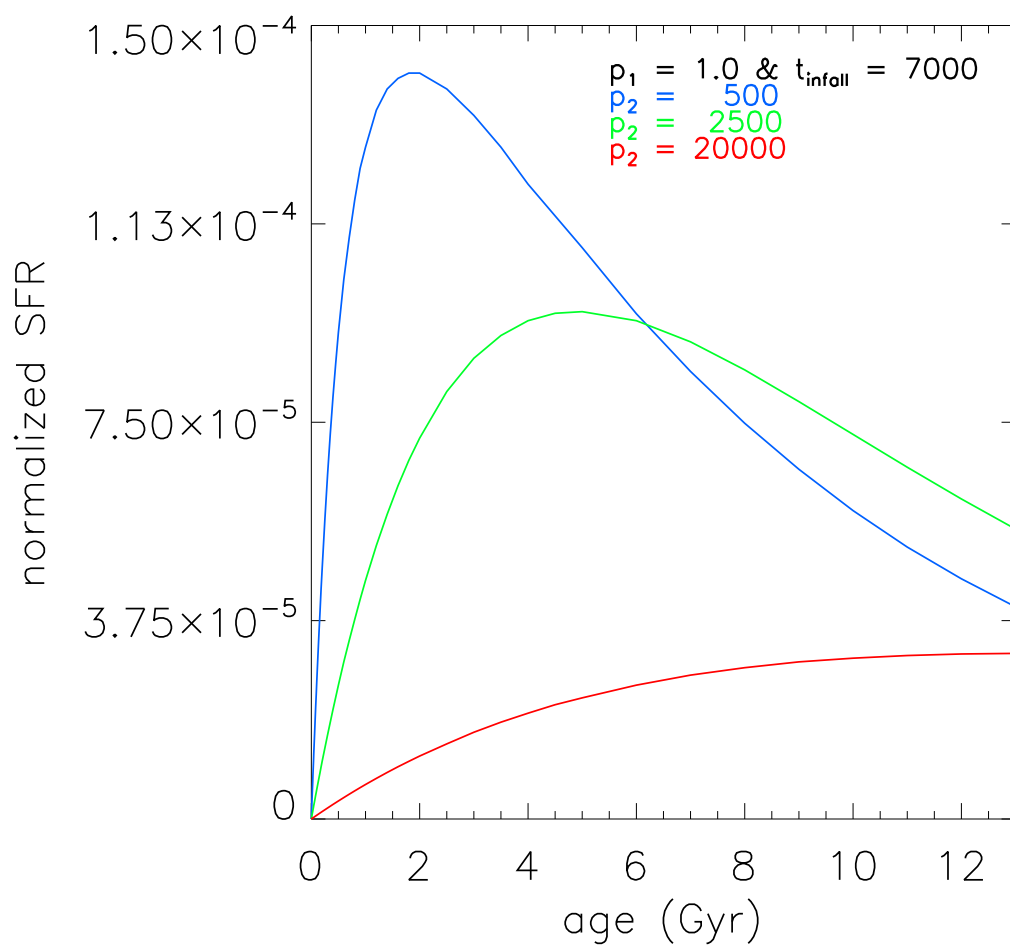
Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την επιλεγμένη ηλικία των 13 Gyr για τους σπειροειδείς συνθετικούς γαλαξίες, διαμορφώνουν το τελικό φάσμα.

Στο σχήμα 2.26 παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_1 , p_2 και t_{infall} στην κατανομή των σπειροειδών γαλαξιών στους άξονες PC1 και PC2. Όπως είναι φανερό, η επιλογή υψηλών τιμών των παραμέτρων αυτών, οι οποίες ορίζουν ασθενείς και μακράς διάρκειας αστρογεννήσεις, οδηγούν στη δημιουργία φασμάτων που μοιάζουν με αυτά των QSFG και των ανώμαλων συνθετικών γαλαξιών. Η διαπίστωση αυτή είναι περισσότερο προφανής στην περίπτωση επιλογής υψηλών τιμών της παραμέτρου p_2 .

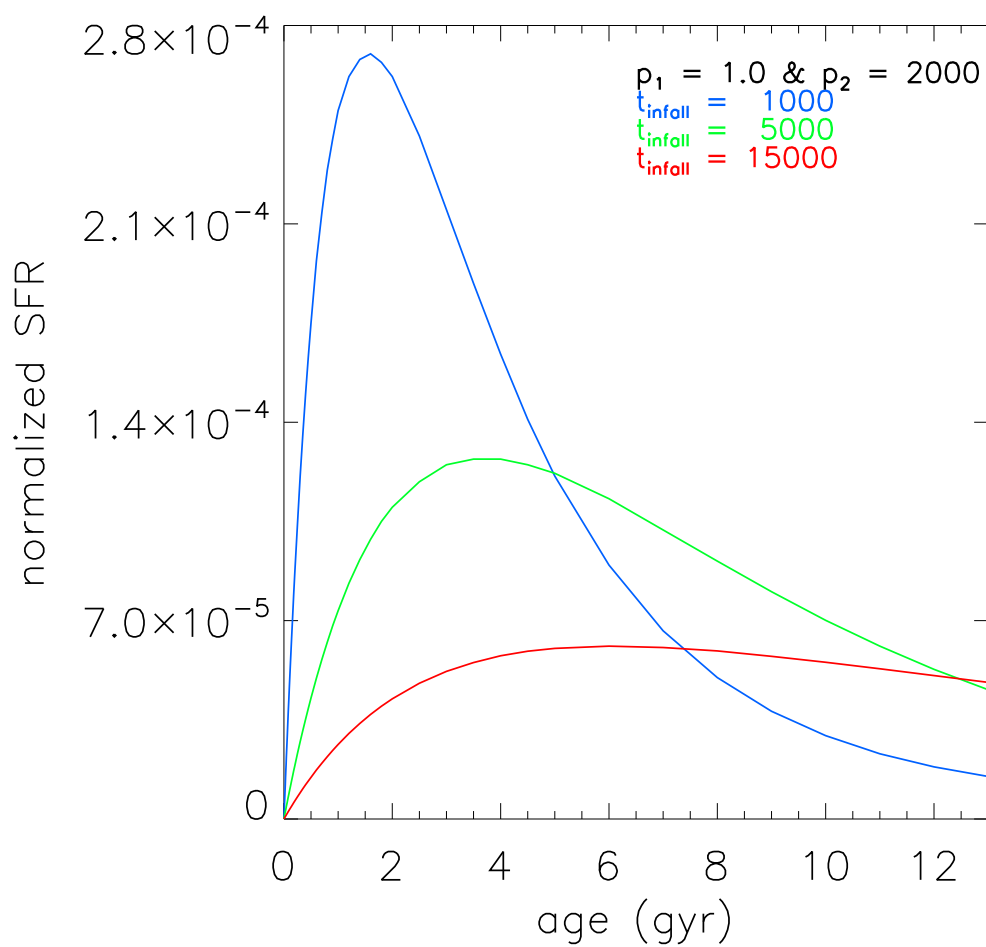
Με βάση την ανωτέρω ανάλυση, περικόπτονται από τη βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων γαλαξιών τα φάσματα σπειροειδών γαλαξιών για τα οποία $p_2 > 5000 \text{ Myr}/M_{\odot}$. Τόσο τα επιλεγμένα-βέλτιστα φάσματα, όσο και τα περικομμένα, παρουσιάζονται εποπτικά στο σχήμα 2.27.



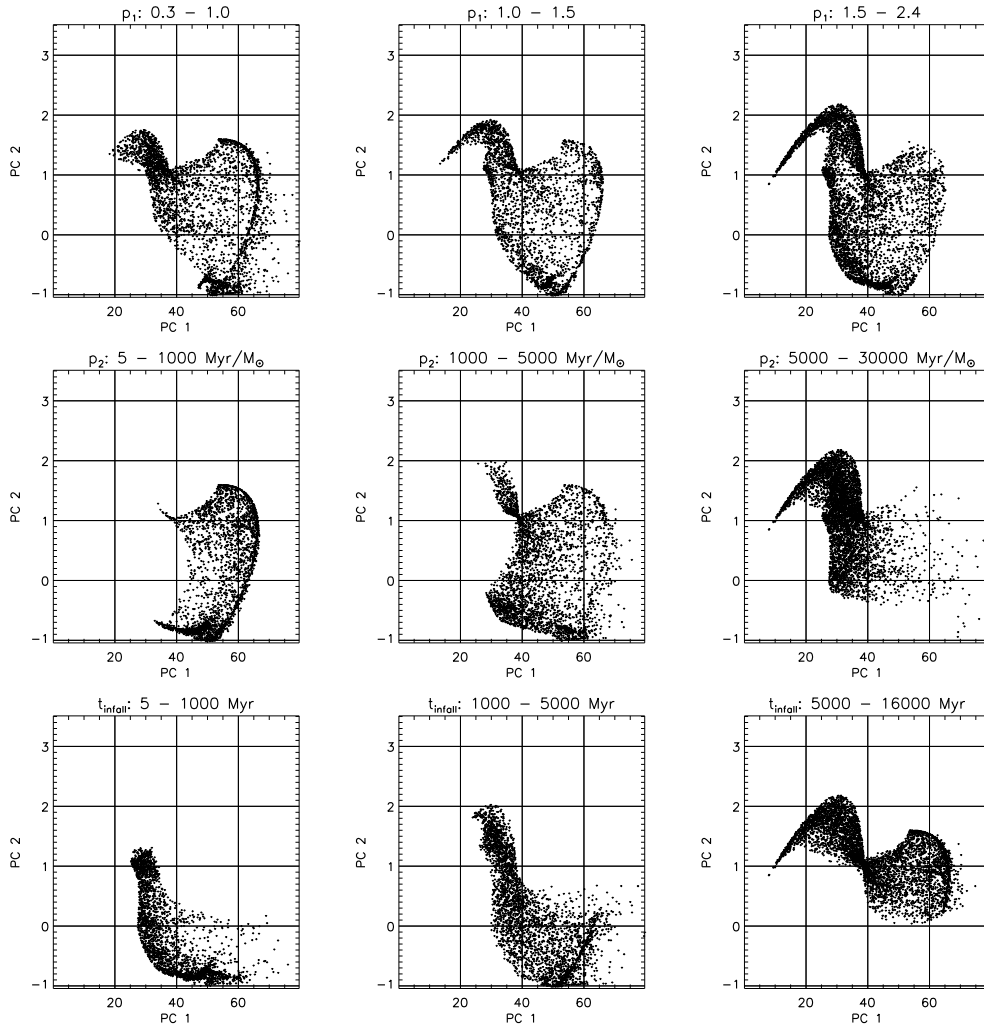
Σχήμα 2.23: Επίδραση της παραμέτρου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_1 στον κανονικοποιημένο ρυθμό αστρικής δημιουργίας στην περίπτωση των σπειροειδών γαλαξιών.



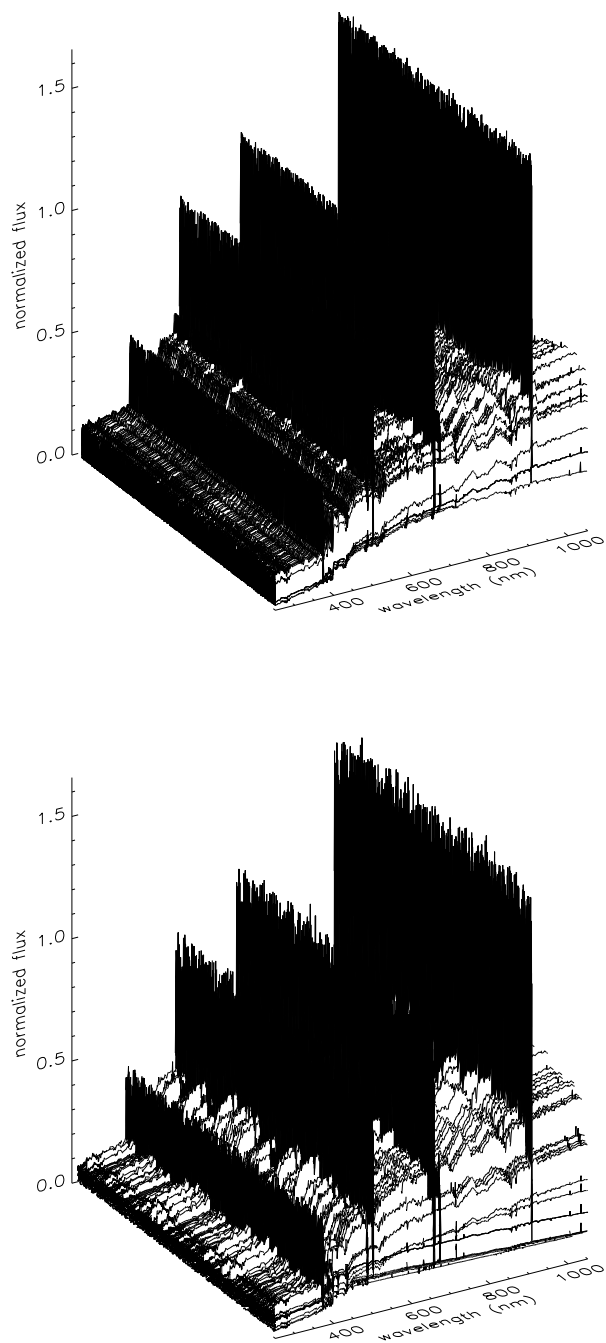
Σχήμα 2.24: Επίδραση της παραμέτρου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_2 στον κανονικοποιημένο ρυθμό αστρικής δημιουργίας στην περίπτωση των σπειροειδών γαλαξιών.



Σχήμα 2.25: Επίδραση της παραμέτρου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας t_{infall} στον κανονικοποιημένο ρυθμό αστρικής δημιουργίας στην περίπτωση των σπειροειδών γαλαξιών.



Σχήμα 2.26: Προβολή των συνθετικών φασμάτων σπειροειδών γαλαξιών στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 για διάφορα εύρη των παραμέτρων p_1 (πρώτη σειρά), p_2 (δεύτερη σειρά) και t_{infall} (τρίτη σειρά).



Σχήμα 2.27: Εποπτική παράθεση των βέλτιστων (πάνω) και των περικομμένων (κάτω) συνθετικών φασμάτων σπειροειδών γαλαξιών.

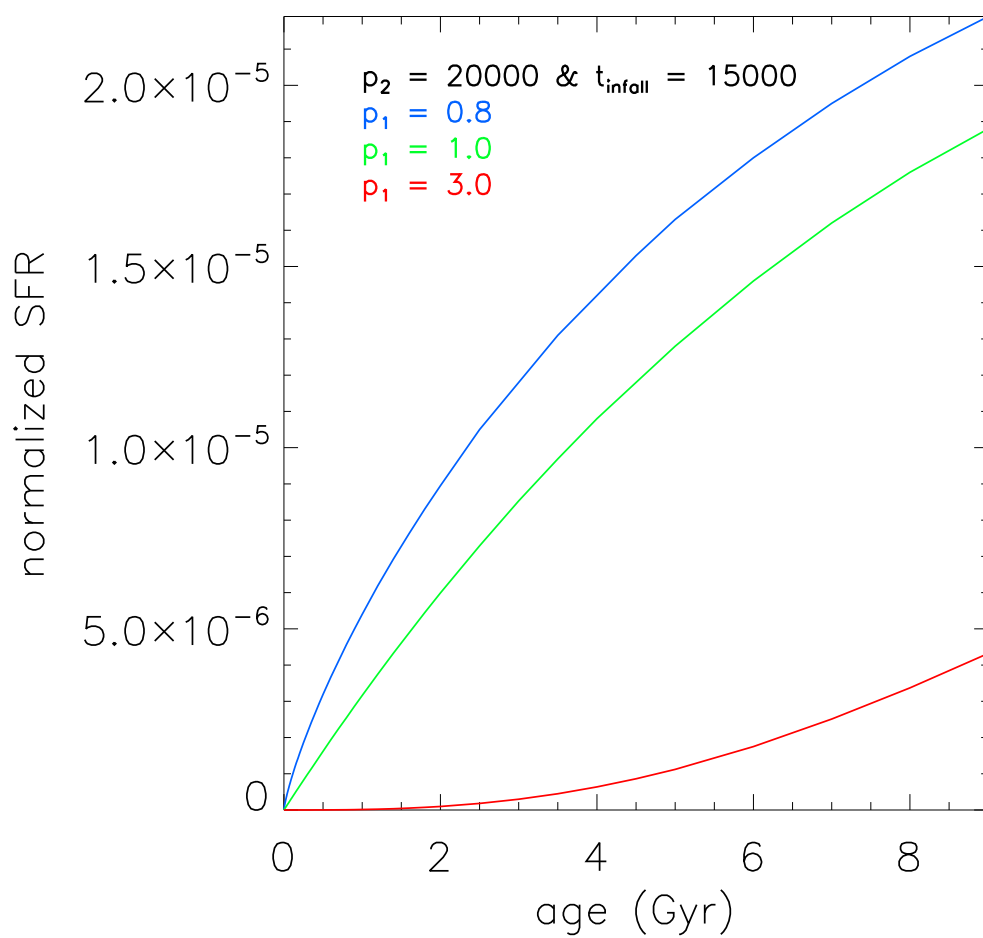
Ανώμαλοι γαλαξίες

Για τη δημιουργία των συνθετικών φασμάτων των ανώμαλων γαλαξιών έχει γίνει χρήση των ρυθμών αστρικής δημιουργίας και συσσώρευσης της περίπτωσης των σπειροειδών γαλαξιών, με την τελική ηλικία όμως να είναι ίση με 9 Gyr. Έτσι, ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας των ανώμαλων γαλαξιών ακολουθεί το ίδιο πρότυπο με αυτό των σπειροειδών γαλαξιών, το οποίο όμως ολοκληρώνεται περισσότερο πρόωρα σε σχέση με αυτούς. Επιπροσθέτως, οι τιμές των παραμέτρων p_1 , p_2 και t_{infall} μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές των σπειροειδών γαλαξιών, ορίζοντας σε ορισμένες περιπτώσεις εξαιρετικά ασθενείς ρυθμούς αστρικής δημιουργίας.

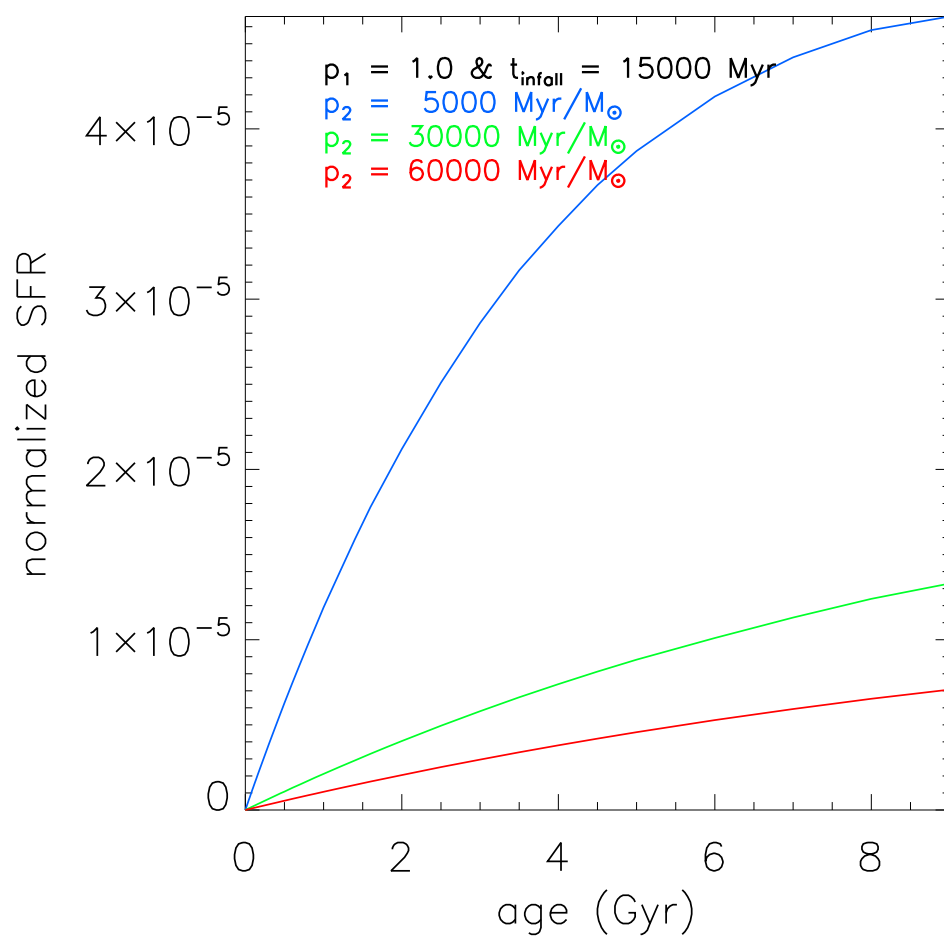
Η επίδραση της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων p_1 , p_2 και t_{infall} στο ρυθμό αστρικής δημιουργίας, παρουσιάζονται στις εικόνες 2.28, 2.29 και 2.30, αντίστοιχα. Η επίδραση των παραμέτρων αυτών στην κατανομή των ανώμαλων γαλαξιών στους άξονες PC1 και PC2, παρουσιάζονται στο σχήμα 2.31, αντίστοιχα. Η επιλογή πολύ υψηλών τιμών των παραμέτρων p_2 και t_{infall} ($p_2 > 40000 \text{ Myr}/M_\odot$, $t_{infall} > 20000 \text{ Myr}$) προκαλεί κατά κανόνα τη δημιουργία φασμάτων με χαμηλές τιμές ροής που αλληλεπικαλύπτονται ισχυρώς με τους QSGF. Επίσης, και παρά το εκτενές εύρος των τιμών των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας, οι γαλαξίες αυτοί συναθροίζονται προς την αρχή των αξόνων του διαγράμματος PC1-PC2. Στο σχήμα 2.32 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύο χρωμάτων ($g - r$) – ($r - i$) των συνθετικών ανώμαλων γαλαξιών για τα διάφορα εύρη της παραμέτρου t_{infall} . Για μεγάλες τιμές της παραμέτρου t_{infall} , τα αντίστοιχα χρώματα των συνθετικών γαλαξιών γίνονται περισσότερο μπλε και μειώνεται το εύρος τους.

Συνεπώς, η τελική μορφή των φασμάτων των ανώμαλων συνθετικών γαλαξιών παρουσιάζει πολύ χαμηλή ευαισθησία στη μεταβολή των υψηλών τιμών των παραμέτρων p_2 και t_{infall} . Η κατάσταση αυτή είναι ανεπιθύμητη κατά τη δημιουργία μίας βιβλιοθήκης φασμάτων, επειδή δημιουργούνται φάσματα με πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους.

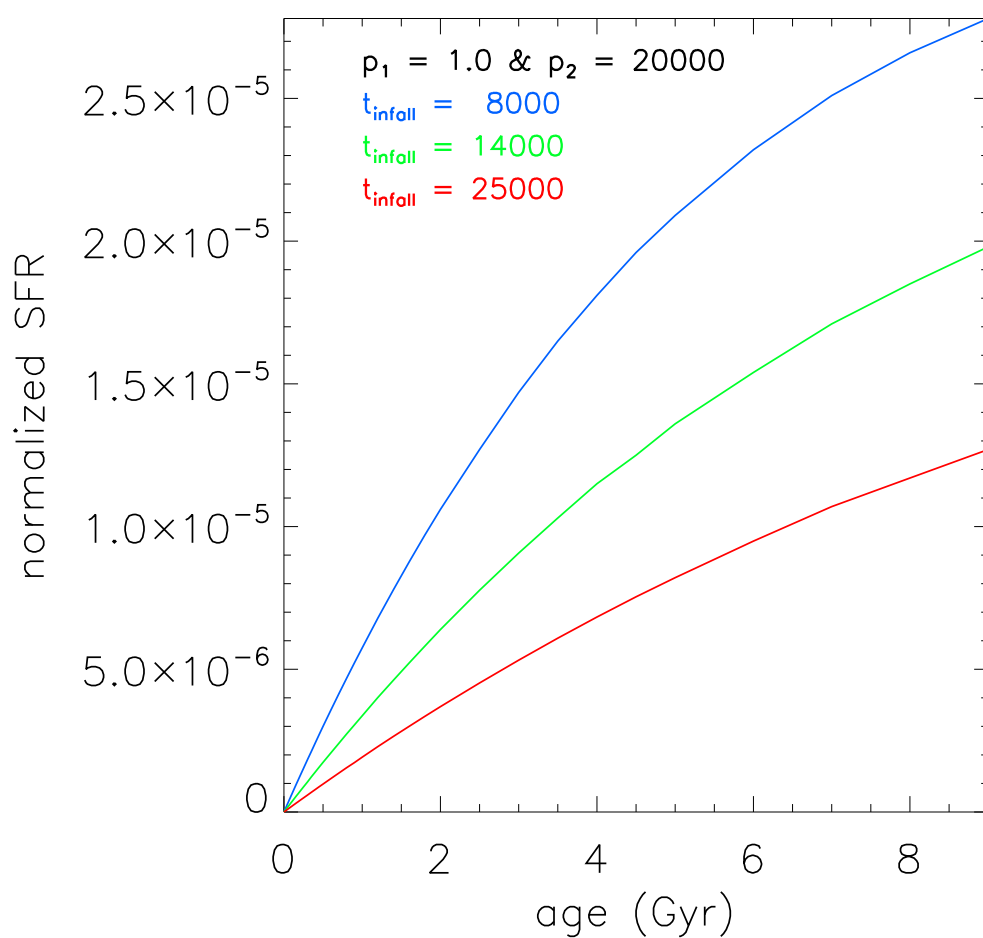
Με βάση την ανωτέρω ανάλυση, περικόπτονται από τη βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων γαλαξιών τα φάσματα ανώμαλων γαλαξιών για τα οποία $p_2 > 40000 \text{ Myr}/M_\odot$ και $t_{infall} > 20000 \text{ Myr}$. Τόσο τα επιλεγμένα-βέλτιστα φάσματα, όσο και τα περικομμένα, παρουσιάζονται εποπτικά στο σχήμα 2.33.



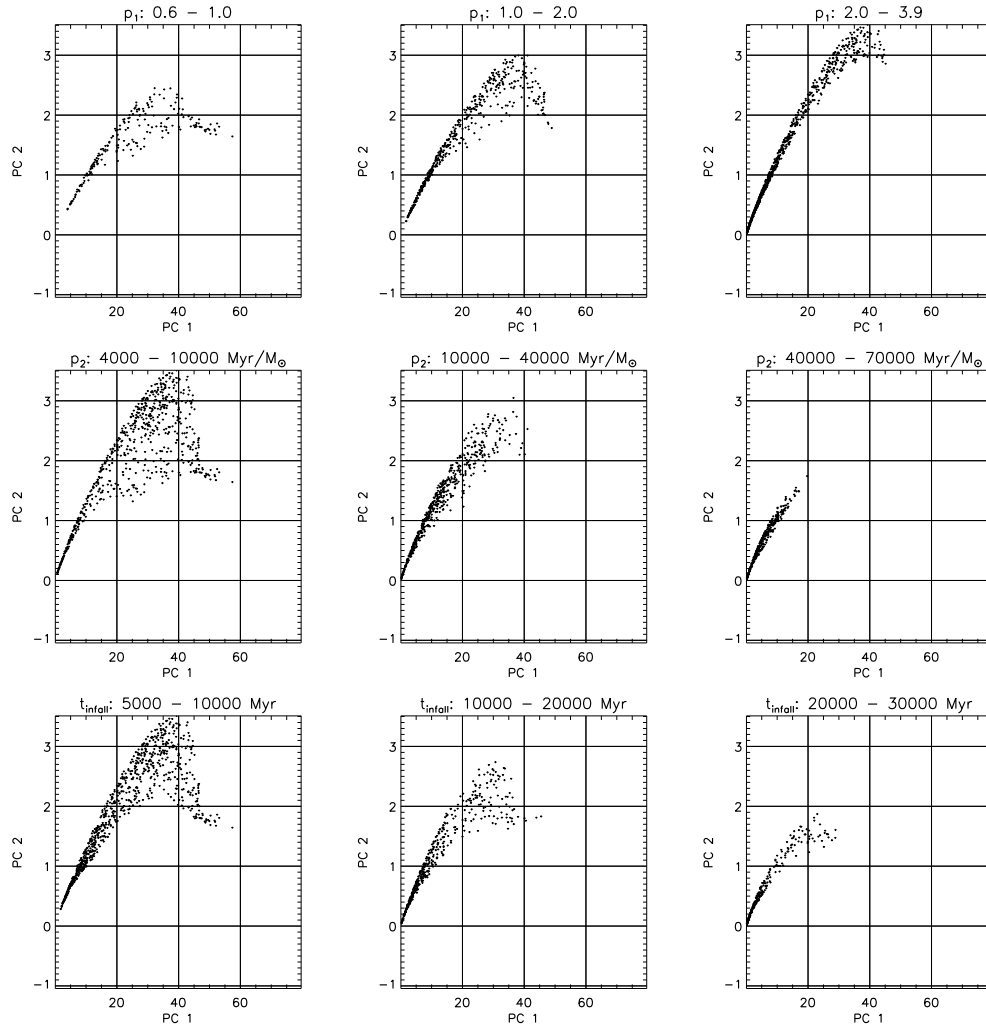
Σχήμα 2.28: Επίδραση της παραμέτρου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_1 στον κανονικοποιημένο ρυθμό αστρικής δημιουργίας στην περίπτωση των ανώμαλων γαλαξιών.



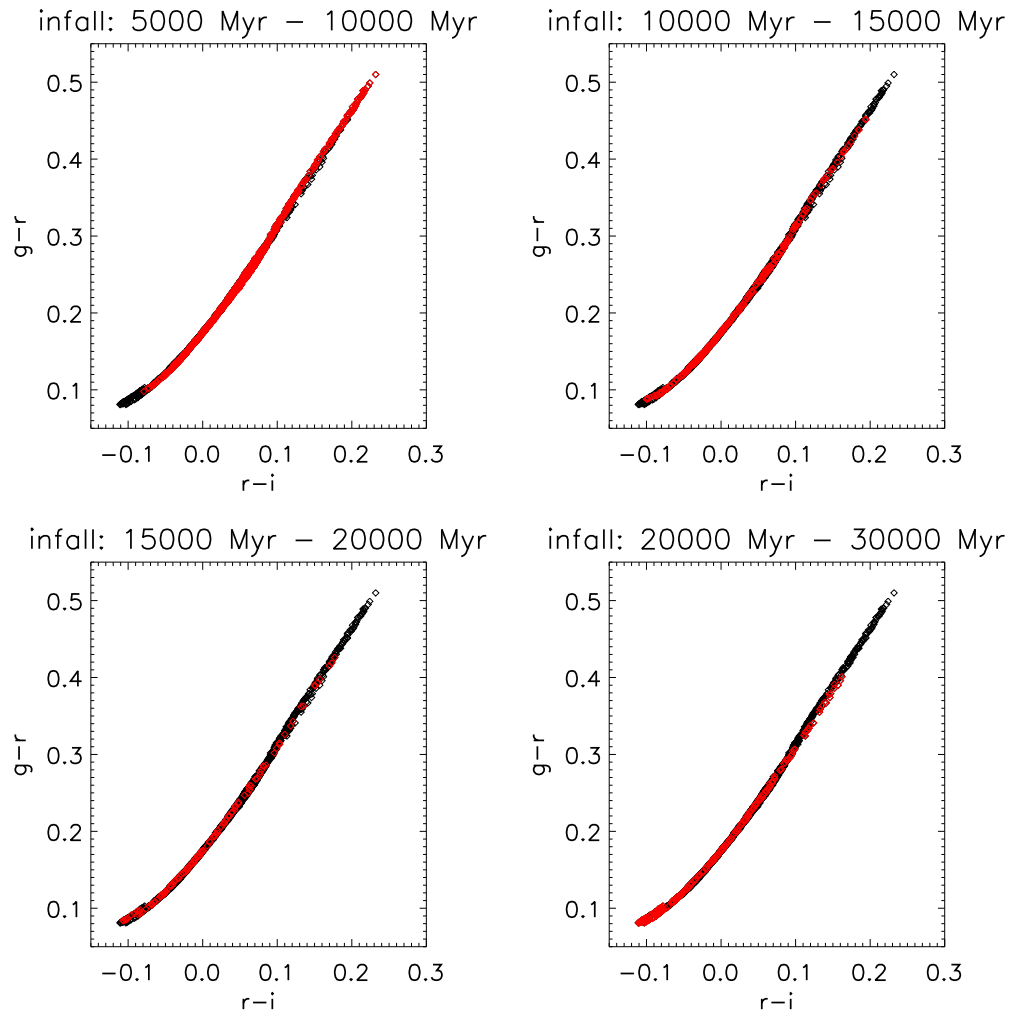
Σχήμα 2.29: Επίδραση της παραμέτρου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_2 στον κανονικοποιημένο ρυθμό αστρικής δημιουργίας στην περίπτωση των ανώμαλων γαλαξιών.



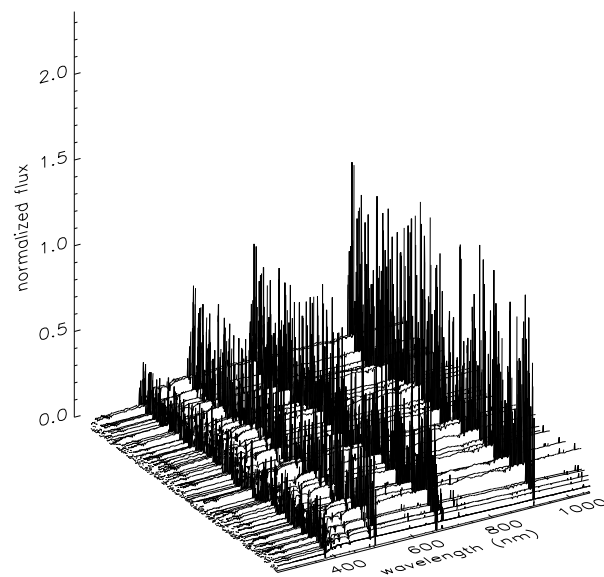
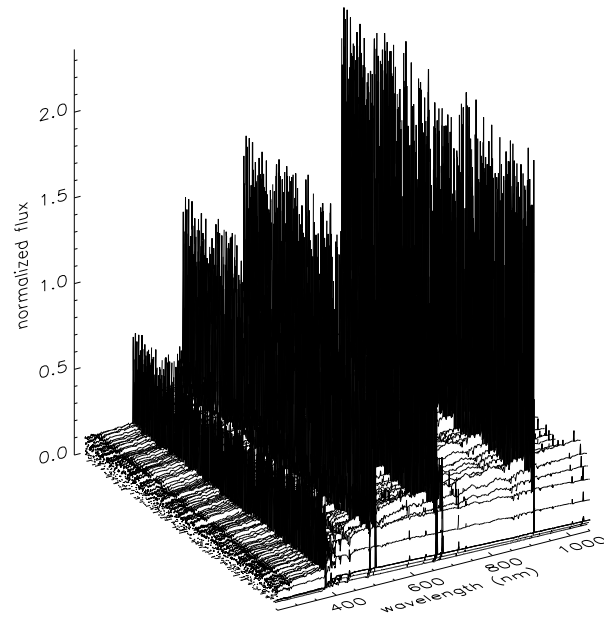
Σχήμα 2.30: Επίδραση της παραμέτρου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας t_{infall} στον κανονικοποιημένο ρυθμό αστρικής δημιουργίας στην περίπτωση των ανώμαλων γαλαξιών.



Σχήμα 2.31: Προβολή των συνθετικών φασμάτων ανώμαλων γαλαξιών στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 για διάφορα εύρη των παραμέτρων p_1 (πρώτη σειρά), p_2 (δεύτερη σειρά) και t_{infall} (τρίτη σειρά).



Σχήμα 2.32: Το διάγραμμα δύο χρωμάτων $(g-r)-(r-i)$ των συνθετικών ανώμαλων γαλαξιών για κάθε αναγραφόμενο εύρος της παραμέτρου t_{infall} (κόκκινα σημεία), σε σχέση με το σύνολο των συνθετικών ανώμαλων γαλαξιών (μαύρα σημεία).



Σχήμα 2.33: Εποπτική παράθεση των βέλτιστων (πάνω) και των περικομμένων (κάτω) συνθετικών φασμάτων ανώμαλων γαλαξιών.

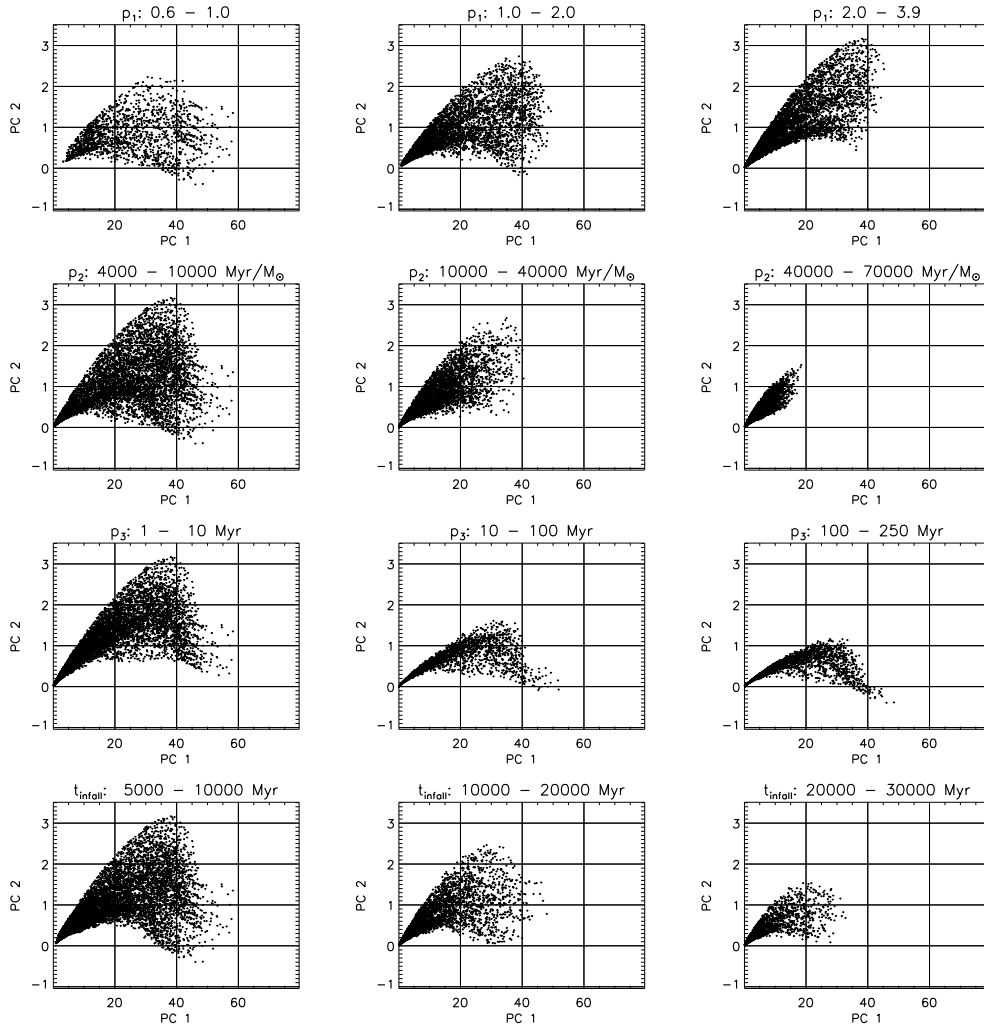
QSFG

Οι συνθετικοί γαλαξίες του συγκεκριμένου φασματικού τύπου αντιμετωπίζονται ως ανώμαλοι γαλαξίες, στους οποίους η αστρογέννεση έχει διακοπεί από ένα έως 250 Myr πριν από την τελική ηλικία των 9 Gyr. Η συγκεκριμένη χρονική διάρκεια ορίζεται από την τιμή της παραμέτρου p_3 . Έτσι, ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας των QSFG είναι μηδενικός για $(9000 - p_3) \text{ Myr} \leq t \leq 9000 \text{ Myr}$. Η επιλογή $p_3 = 0$ θα δημιουργούσε έναν ανώμαλο γαλαξία. Ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας, καθώς και το ακριβές εύρος των τιμών των υπολοίπων παραμέτρων p_1 , p_2 και t_{infall} των QSFG, είναι ίδια με αυτά των ανώμαλων γαλαξιών.

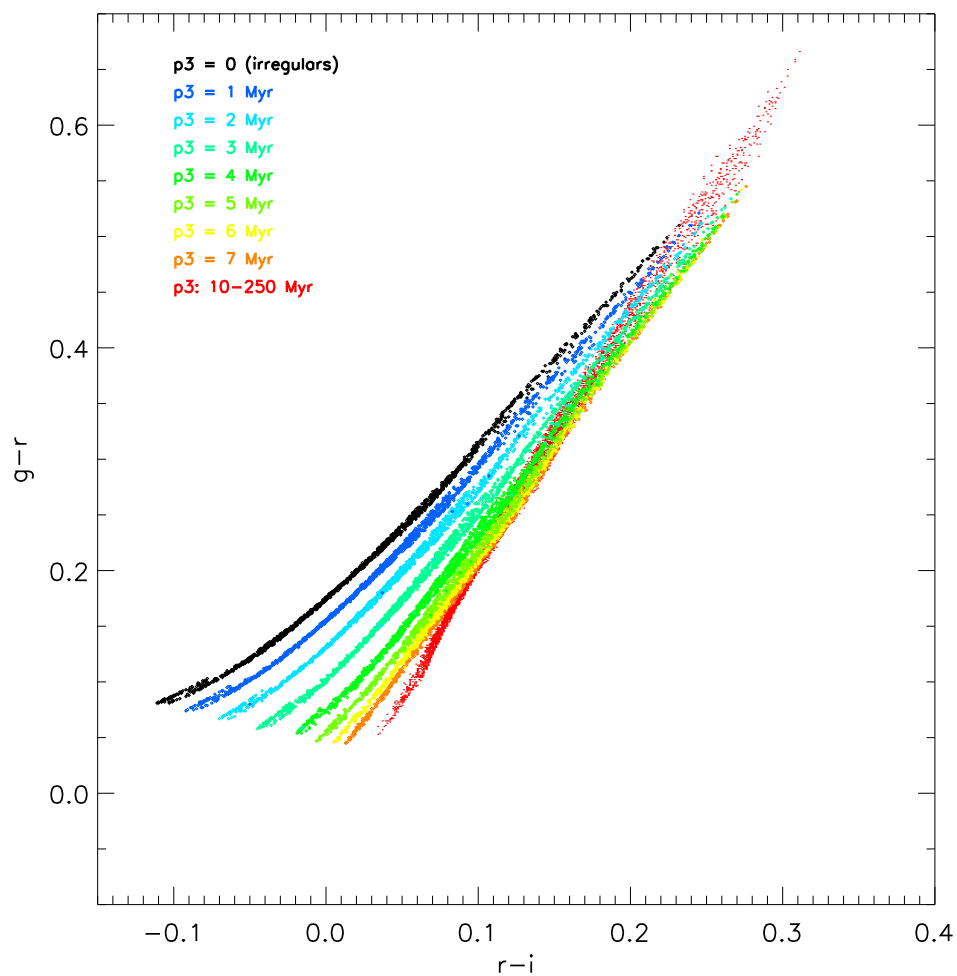
Η επίδραση της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων p_1 , p_2 και t_{infall} στους άξονες PC1 και PC2 παρουσιάζονται στο σχήμα 2.34. Η αντίστοιχη επίδραση των τιμών αυτών στο ρυθμό αστρικής δημιουργίας δεν παρουσιάζεται, λόγω της ομοιότητάς τους με τα αντίστοιχα διαγράμματα των ανώμαλων γαλαξιών. Από τη μελέτη του σχήματος 2.34 φαίνεται ότι η επιλογή πολύ υψηλών τιμών των παραμέτρων p_2 και t_{infall} προκαλεί κατά κανόνα τη δημιουργία φασμάτων QSFG με χαμηλές τιμές ροής που αλληλεπικαλύπτονται ισχυρώς με τους ανώμαλους γαλαξίες. Επίσης, και παρά το εκτενές εύρος των τιμών των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας, οι γαλαξίες αυτοί συναθροίζονται προς την αρχή των αξόνων του διαγράμματος PC1-PC2. Επιπλέον, η επιλογή $p_3 > 10 \text{ Myr}$ δημιουργεί φάσματα που αλληλεπικαλύπτονται ισχυρώς με σπειροειδείς γαλαξίες και γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου.

Στο σχήμα 2.35 παρουσιάζεται η κατανομή των συνθετικών γαλαξιών QSFG στο διάγραμμα δύο χρωμάτων $(g - r) - (r - i)$ για τις διάφορες περιπτώσεις της παραμέτρου p_3 . Στο ίδιο διάγραμμα έχει σχεδιαστεί και η αντίστοιχη κατανομή των ανώμαλων συνθετικών γαλαξιών για λόγους σύγκρισης. Υπενθυμίζεται ότι οι ανώμαλοι γαλαξίες αντιστοιχούν σε γαλαξίες QSFG με $p_3 = 0 \text{ Myr}$. Είναι φανερό ότι η ποικιλία των γαλαξιών QSFG με $p_3 > 10 \text{ Myr}$ είναι σαφώς μικρότερη των υπολοίπων. Στο σχήμα 2.36 παρουσιάζονται τα μέσα φάσματα των γαλαξιών QSFG για διάφορα εύρη τιμών της παραμέτρου p_3 . Τα φάσματα με $p_3 > 10 \text{ Myr}$ δεν έχουν γραμμές εκπομπής, επειδή ο θάνατος των αστέρων μεγάλης μάζας έχει ήδη επέλθει.

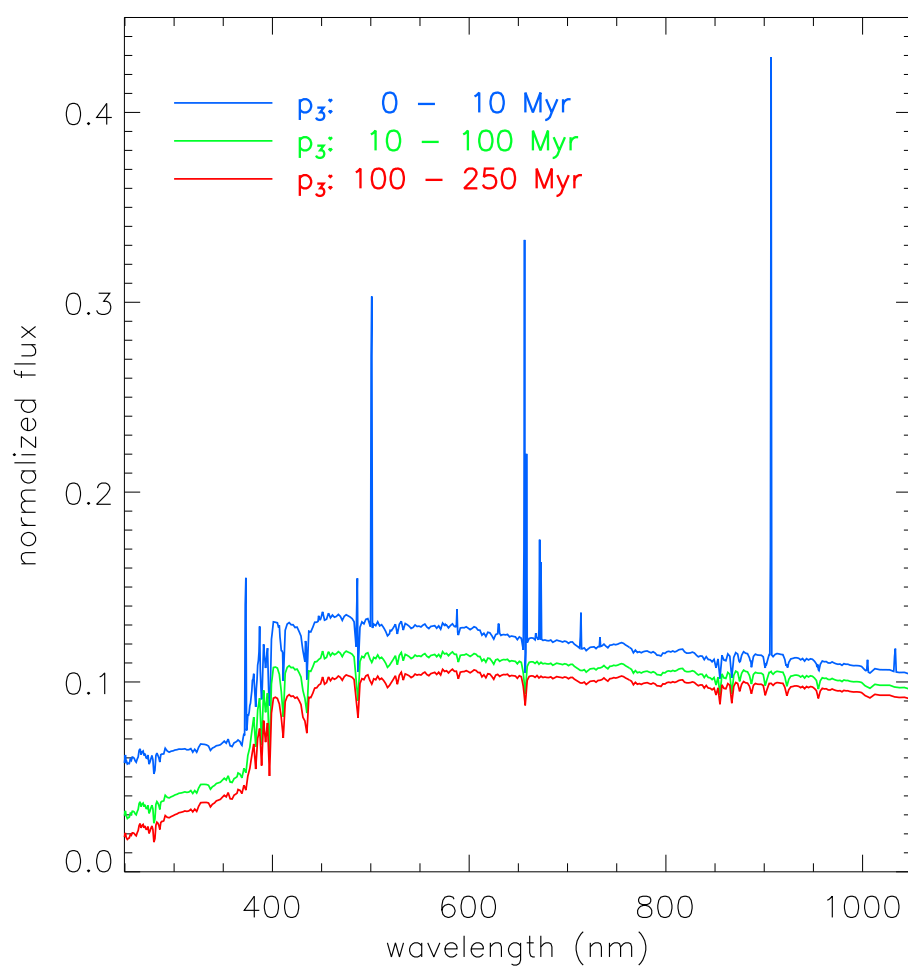
Με βάση την ανωτέρω ανάλυση και σε συμφωνία με τα αντίστοιχα συμπεράσματα στην περίπτωση των ανώμαλων γαλαξιών, περικόπτονται από τη βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων γαλαξιών τα φάσματα των QSFG με $p_2 > 40000 \text{ Myr}/M_\odot$, $p_3 > 10 \text{ Myr}$ και $t_{\text{infall}} > 20000 \text{ Myr}$. Τόσο τα επιλεγμένα-βέλτιστα φάσματα, όσο και τα περικομμένα, παρουσιάζονται εποπτικά στο σχήμα 2.37.



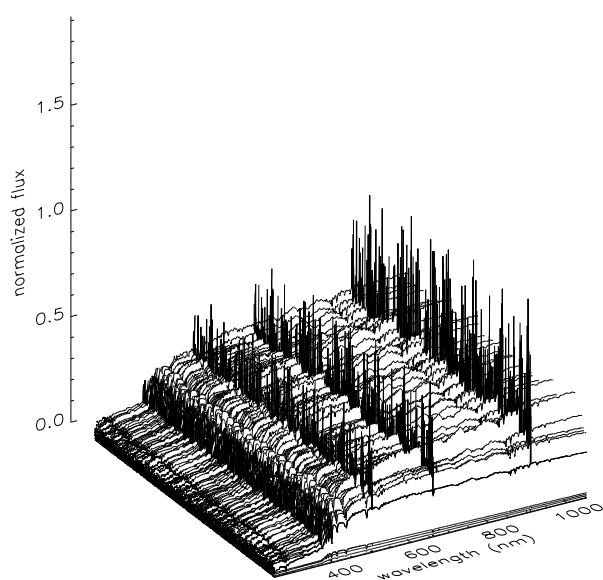
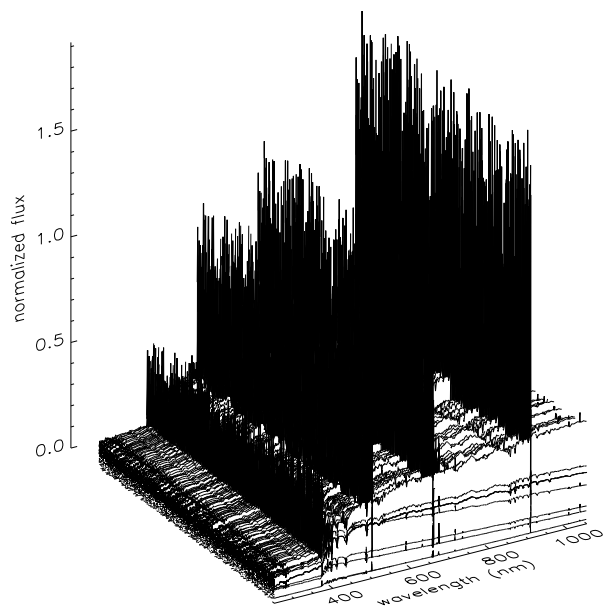
Σχήμα 2.34: Προβολή των συνθετικών φασμάτων των QSGF στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 για διάφορα εύρη των παραμέτρων p_1 (πρώτη σειρά), p_2 (δεύτερη σειρά), p_3 (τρίτη σειρά) και t_{infall} (τέταρτη σειρά).



Σχήμα 2.35: Η κατανομή των συνθετικών γαλαξιών QSFG στο διάγραμμα δύο χρωμάτων $(g - r) - (r - i)$ για τις διάφορες περιπτώσεις της παραμέτρου p_3 . Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζεται και η αντίστοιχη κατανομή των ανώμαλων συνθετικών γαλαξιών (μαύρα σημεία).



Σχήμα 2.36: Τα μέσα φάσματα των QSGF για διάφορα εύρη τιμών της παραμέτρου p_3 του ρυθμού αστρικής δημιουργίας.



Σχήμα 2.37: Εποπτική παράθεση των βέλτιστων (πάνω) και των περικομμένων (κάτω) συνθετικών φασμάτων των γαλαξιών QSFG.

2.2.3 Επιλογή των βέλτιστων φασμάτων

Η προηγούμενη ανάλυση υποδεικνύει τα γενικά κριτήρια βάσει των οποίων δύνανται να περικοπούν από τη συνθετική βιβλιοθήκη γαλαξιακών φασμάτων τα μη επιθυμητά φάσματα. Τα κριτήρια περικοπής είναι τα εξής:

1. Γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου με γραμμές εκπομπής (ομοιότητα με σπειροειδείς)
2. Γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου με εξαιρετικά ασθενή αρχικό ρυθμό αστρικής δημιουργίας
3. Σπειροειδείς γαλαξίες με πολύ υψηλές τιμές της παραμέτρου p_2 (ομοιότητα με ανώμαλους γαλαξίες και QSFG)
4. Ανώμαλοι γαλαξίες και QSFG με εξαιρετικά υψηλές τιμές των παραμέτρων p_2 και t_{infall} (όμοιοι μεταξύ τους)
5. QSFG χωρίς γραμμές εκπομπής (ομοιότητα με σπειροειδείς)

Στον Πίνακα 2.8 καταγράφονται τα όρια των παραμέτρων της αστρικής δημιουργίας που αντιστοιχούν στα βέλτιστα συνθετικά φάσματα γαλαξιών (Karampelas et al., 2012). Ο Πίνακας 2.9 περιλαμβάνει τον συνολικό αριθμό των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων και τα αντίστοιχα ποσά για κάθε φασματικό τύπο, σε σύγκριση με την αρχική συνθετική βιβλιοθήκη.

Ένα δείγμα βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών όλων των φασματικών τύπων, επιλεγμένων με τυχαίο τρόπο, παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

Η μέθοδος PCA εφαρμόστηκε στη βιβλιοθήκη των βέλτιστων φασμάτων, όπως αυτά επιλέχθηκαν εξαιρώντας από την αρχική βιβλιοθήκη εκείνα τα φάσματα που ικανοποιούσαν τα παραπάνω κριτήρια περικοπής. Οι πιο σημαντικές κύριες συνιστώσες των βέλτιστων φασμάτων είναι σχεδόν ίδιες με τις αντίστοιχες της αρχικής βιβλιοθήκης. Οι 48 κυριότερες συνιστώσες (PC1 - PC48) των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

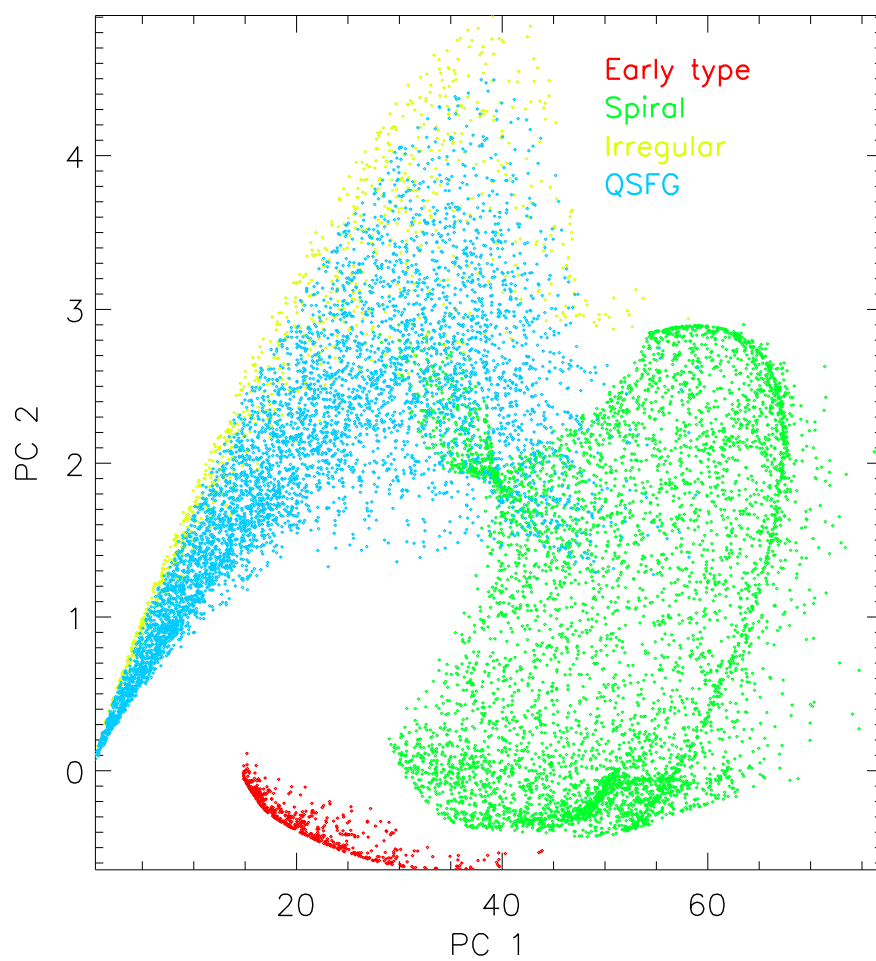
Η προβολή των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 φαίνεται στο σχήμα 2.38, καθώς και στο σχήμα 2.39 για κάθε φασματικό τύπο ξεχωριστά. Οι συνιστώσες αυτές φέρουν σφάλμα 1% στη φασματική ανακατασκευή και περιέχουν το 99 % της ολικής διακύμανσης. Η προβολή των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών για όλους τους ανά δύο δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ των συνιστωσών PC1 - PC4 και για όλους τους φασματικούς τύπους ταυτόχρονα, καθώς και η τρισδιάστατη

Πίνακας 2.8: Το βέλτιστο εύρος των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας για κάθε φασματικό τύπο γαλαξιών της συνθετικής βιβλιοθήκης. Οι παράμετροι p_1 και p_2 αντιστοιχούν στους εκάστοτε νόμους αστρικής δημιουργίας.

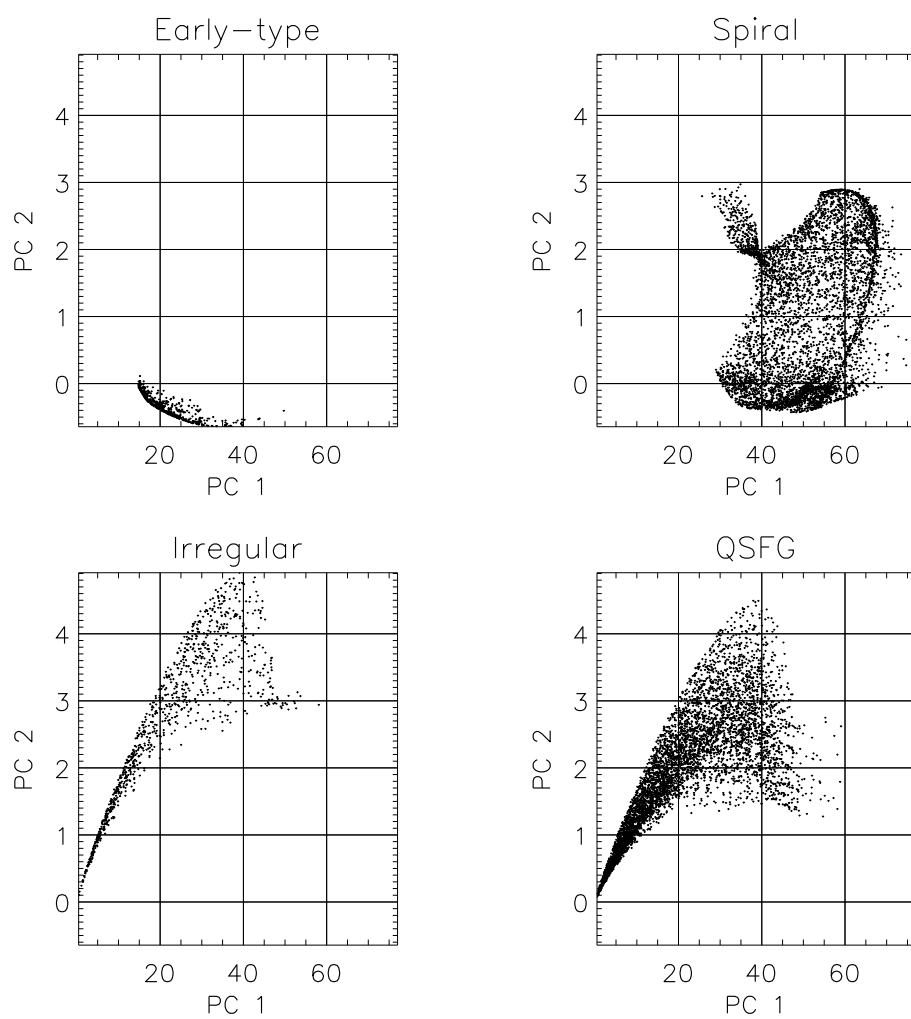
Γαλαξίες Προγενέστερου φασματικού τύπου	
p_1	10 - 2 000 (Myr)
p_2	0.5 - 1.5 ($M_\odot$)
Σπειροειδείς γαλαξίες	
p_1	0.3 - 2.4
p_2	5 - 5 000 ($Myr/M_\odot$)
t_{infall}	5 - 16 000 (Myr)
Ανώμαλοι γαλαξίες	
p_1	0.6 - 3.9
p_2	4 000 - 40 000 ($Myr/M_\odot$)
t_{infall}	5 000 - 20 000 (Myr)
QSFG	
p_1	0.6 - 3.9
p_2	4 000 - 40 000 ($Myr/M_\odot$)
p_3	1 - 10 (Myr)
t_{infall}	5 000 - 20 000 (Myr)

Πίνακας 2.9: Ο αριθμός των φασμάτων γαλαξιών που περιέχονται στην αρχική συνθετική βιβλιοθήκη και στη βέλτιστη συνθετική βιβλιοθήκη, για κάθε φασματικό τύπο.

	συνθετική βιβλιοθήκη	βέλτιστη συνθετική βιβλιοθήκη
Γαλαξίες Προγενέστερου		
φασματικού τύπου	2 816	554
Σπειροειδείς γαλαξίες	10 569	5 711
Ανώμαλοι γαλαξίες	1 500	948
QSFG	14 000	5 171
	28 885	12 384



Σχήμα 2.38: Προβολή των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 όλων των φασματικών τύπων ταυτόχρονα.



Σχήμα 2.39: Προβολή των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 για κάθε φασματικό τύπο.

αντίστοιχη προβολή στις συνιστώσες PC1, PC2 και PC3, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.

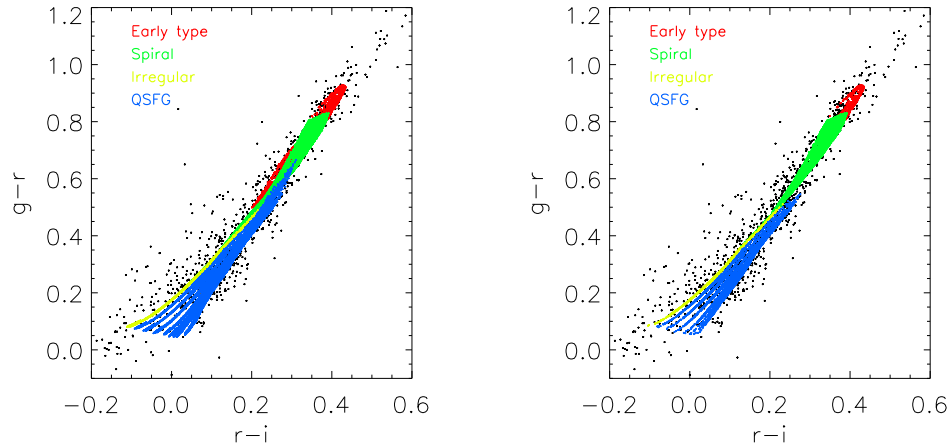
Από τη στιγμή που οι συνιστώσες δε μεταβλήθηκαν σημαντικά, η κατανομή των βέλτιστων φασμάτων σε αυτές ακολουθεί τις γενικές τάσεις που απεικονίζονται στις εικόνες 2.38 και 2.39. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης όμως είναι εμφανή: Οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου σχηματίζουν μία πλήρως ξεχωριστή ομάδα, η οποία πλέον δεν αλληλεπικαλύπτεται με αυτή των σπειροειδών γαλαξιών και δεν περιέχει γαλαξίες με μη επιθυμητό ρυθμό αστρικής δημιουργίας. Ταυτόχρονα, οι αλληλεπικαλύψεις μεταξύ σπειροειδών και ανωμάλων γαλαξιών και μεταξύ σπειροειδών και QSFG έχουν περιοριστεί σε μία σχετικά μικρή περιοχή του χώρου των δύο κυριότερων συνιστωσών. Επιπροσθέτως, η υψηλή συγκέντρωση όμοιων μεταξύ τους φασμάτων μεταγενέστερου φασματικού τύπου στην κάτω αριστερά περιοχή του διαγράμματος έχει περιοριστεί αισθητά (Karampelas et al., 2012).

Το σχήμα 2.40 παρουσιάζει την κατανομή των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στο διάγραμμα των δύο χρωμάτων $(g - r) - (r - i)$, πριν και μετά την πραγματοποιηθείσα βελτιστοποίηση, σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή των παρατηρούμενων φασμάτων γαλαξιών από το SDSS (Karampelas et al., 2012). Οι εικόνες 2.41 και 2.42 παραθέτουν τα ίδια διαγράμματα για κάθε φασματικό τύπο ξεχωριστά. Ο περιορισμός των αλληλεπικαλύψεων στο χώρο των χρωμάτων αυτών είναι απόρροια του περιορισμού των αλληλοεπικαλύψεων στο χώρο των δύο Κυριότερων Συνιστωσών. Ιδιαίτερη μνεία θα μπορούσε να γίνει στη διακριτή ομαδοποίηση των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου στην περιοχή $(g - r) > 0.8$, καθώς και στην εξάλειψη της εκτεταμένης αλληλεπικάλυψης μεταξύ σπειροειδών και QSFG στην περιοχή $0.5 < (g - r) < 0.6$. Η ικανοποιητική κάλυψη των παρατηρήσεων από το SDSS έχει διατηρηθεί.

2.2.4 Κατάλογος βέλτιστων φασμάτων

Τα βέλτιστα συνθετικά φάσματα γαλαξιών καταλογοποιήθηκαν και αναρτήθηκαν στο Κέντρο Αστρονομικών Δεδομένων CDS του Στρασβούργου (Centre de Données astronomiques de Strasbourg). Ο κατάλογος (Karampelas et al., 2011) είναι διαθέσιμος είτε μέσω της υπηρεσίας αστρονομικών καταλόγων VizieR (<http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/538/A38>), είτε μέσω ανώνυμου ftp ([cdsarc.u-strasbg.fr](ftp://cdsarc.u-strasbg.fr) - 130.79.128.5). Περιέχει ένα αρχείο τύπου fit (spectra.fit) με τα 12 384 βέλτιστα φάσματα, ένα αρχείο με τις τιμές των μηκών κύματος που αντιστοιχούν στα pixels ροής του πρώτου αρχείου (wavelen.dat), και ένα αρχείο ReadMe με τις κατάλληλες περιγραφές και παρατηρήσεις που σχετίζονται με τον κατάλογο.

Στο σχήμα 2.43 παρουσιάζονται πέντε από τα βέλτιστα συνθετικά φάσματα γαλαξιών. Το συγκεκριμένο διάγραμμα δημιουργήθηκε με το εργαλείο απεικό-



Σχήμα 2.40: Η κατανομή των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στο διάγραμμα των δύο χρωμάτων $(g - r) - (r - i)$ πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την πραγματοποιηθείσα βελτιστοποίηση, σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή των παρατηρούμενων φασμάτων γαλαξιών από το SDSS (μαύρα σημεία).

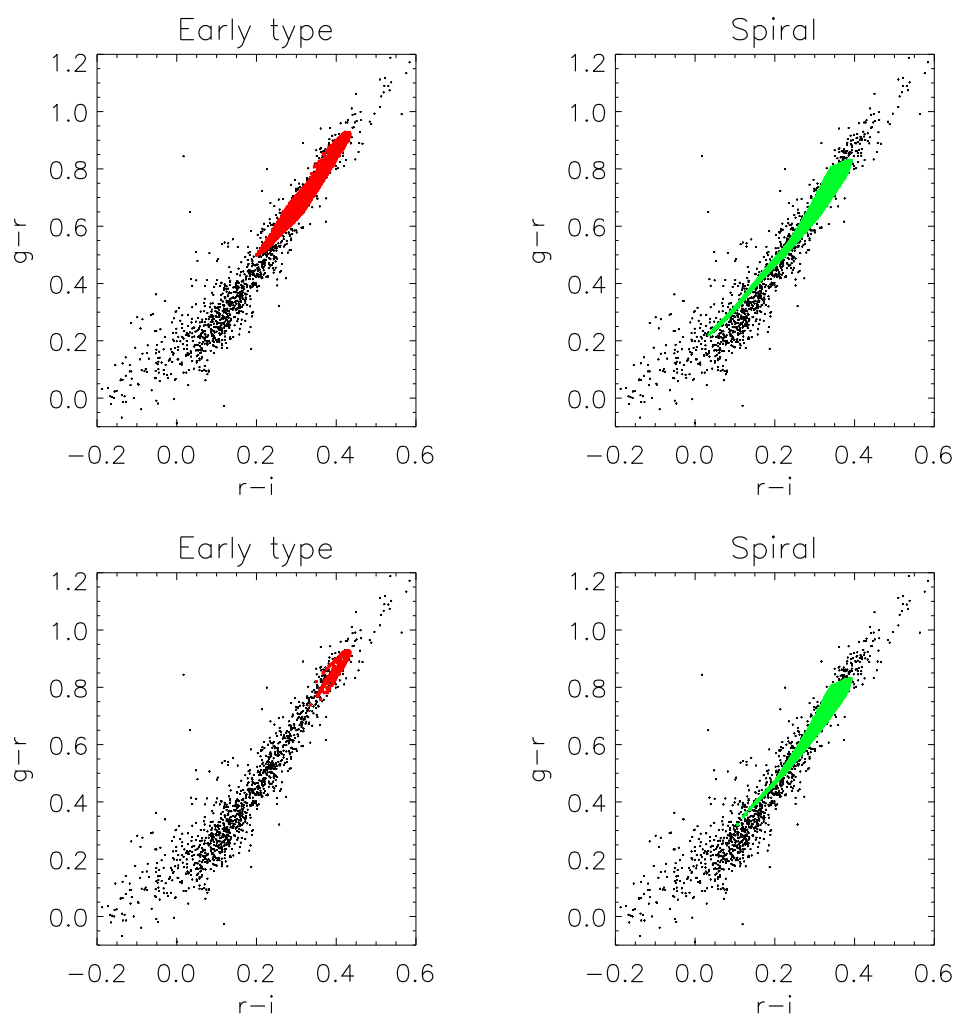
νισης της υπηρεσίας Vizier και ανακτήθηκε ως μεμονωμένο αρχείο. Ο χρήστης μπορεί να λάβει το διάγραμμα οποιουδήποτε από τα φάσματα του καταλόγου και σε οποιοδήποτε τμήμα του εύρους των μηκών κύματος.

Στο σχήμα 2.44 παρουσιάζεται ένα τμήμα του αρχείου spectra.fit με τα συνθετικά φάσματα του καταλόγου, με τη βοήθεια της εφαρμογής απεικόνισης αστρονομικών δεδομένων SAOImage DS9 (<http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/>).

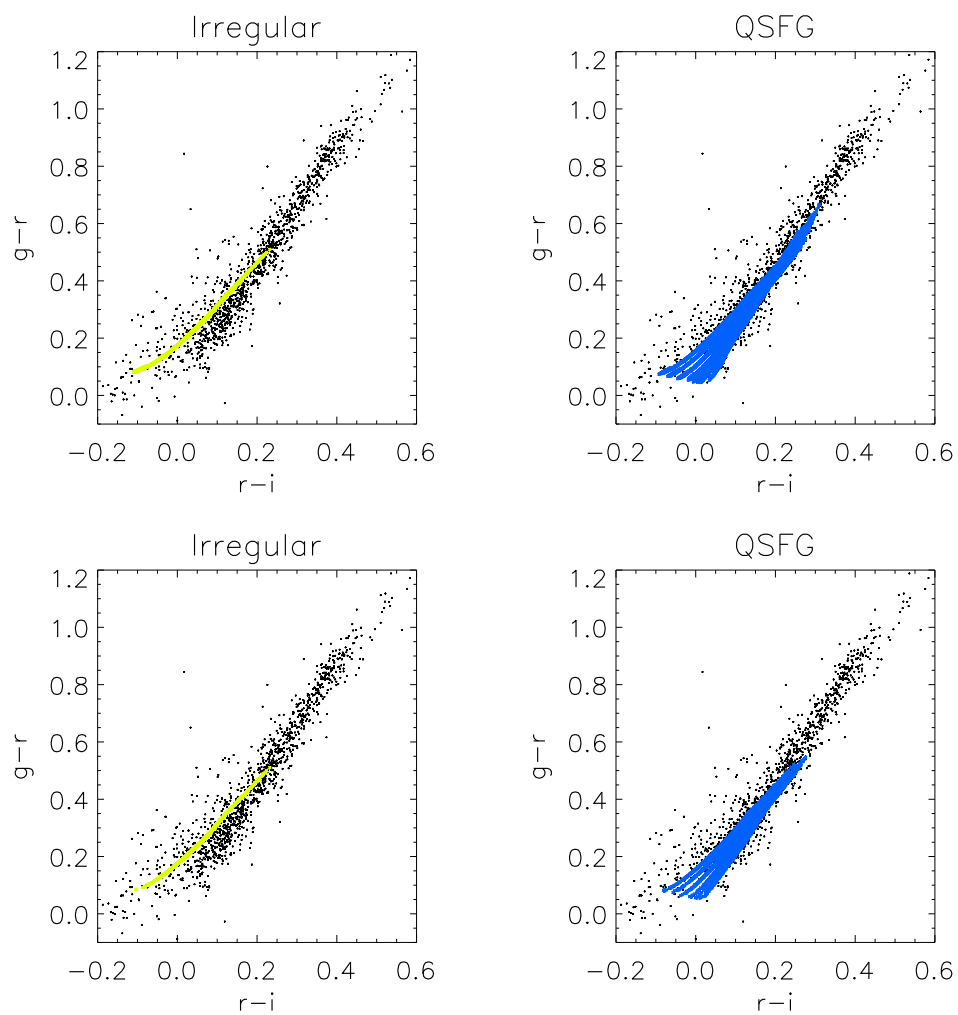
2.2.5 Προσομοιωμένη βιβλιοθήκη

Η διερεύνηση της επίδρασης της βελτιστοποίησης της συνθετικής βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στις επιδόσεις του συστήματος UGC είναι σημαντική για την περαιτέρω ανάπτυξή του. Η μέθοδος SVM εφαρμόστηκε από το σύστημα UGC ξεχωριστά για τα αρχικά και τα βέλτιστα φάσματα, όπου σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν δύο σετ προσομοιωμένων φασμάτων: Το πρώτο περιείχε φάσματα τα οποία δεν είχαν θόρυβο, απορρόφηση ή ερυθρομετατόπιση «(καθαρά» προσομοιωμένα φάσματα), ενώ το δεύτερο περιείχε και τους τρεις παράγοντες αλλοίωσης «(ρεαλιστικά» προσομοιωμένα φάσματα). Τα συνθετικά φάσματα γαλαξιών είχαν προσομοιωθεί στο μέγεθος $G = 15$.

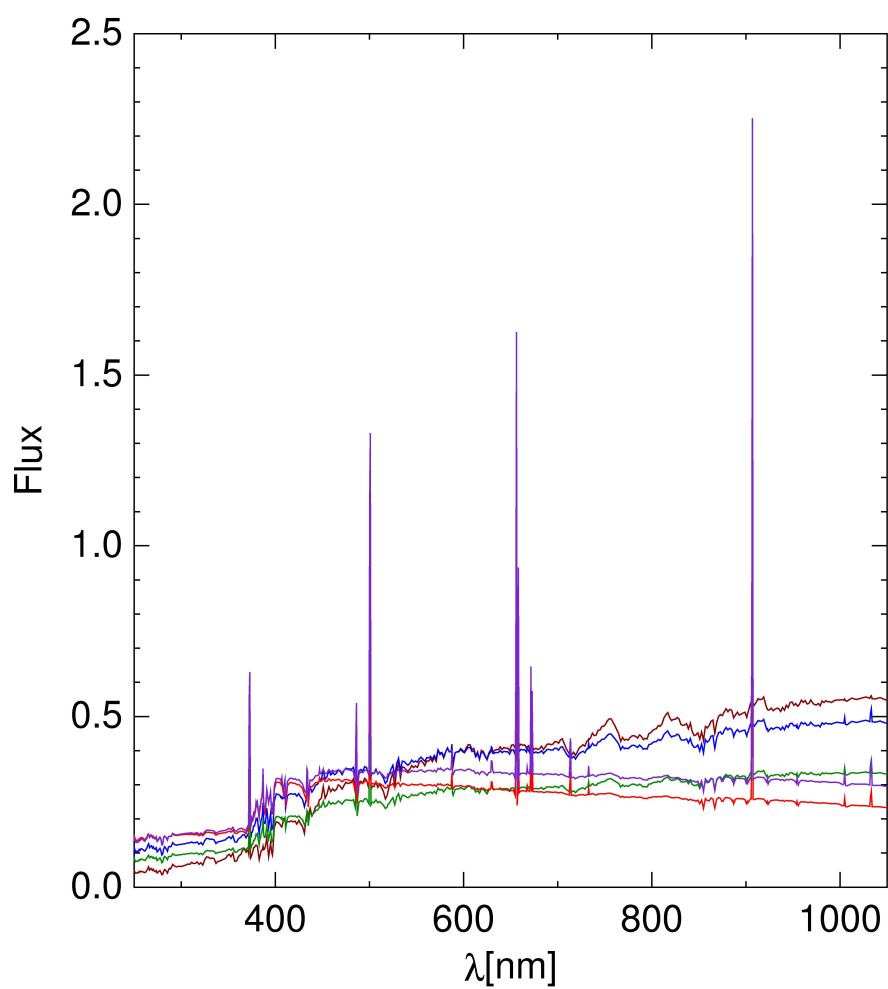
Η απόδοση του UGC στην ταξινόμηση των καθαρών προσομοιωμένων φασμάτων, ορισμένη ως το ποσοστό των επιτυχών προβλέψεων του φασματικού



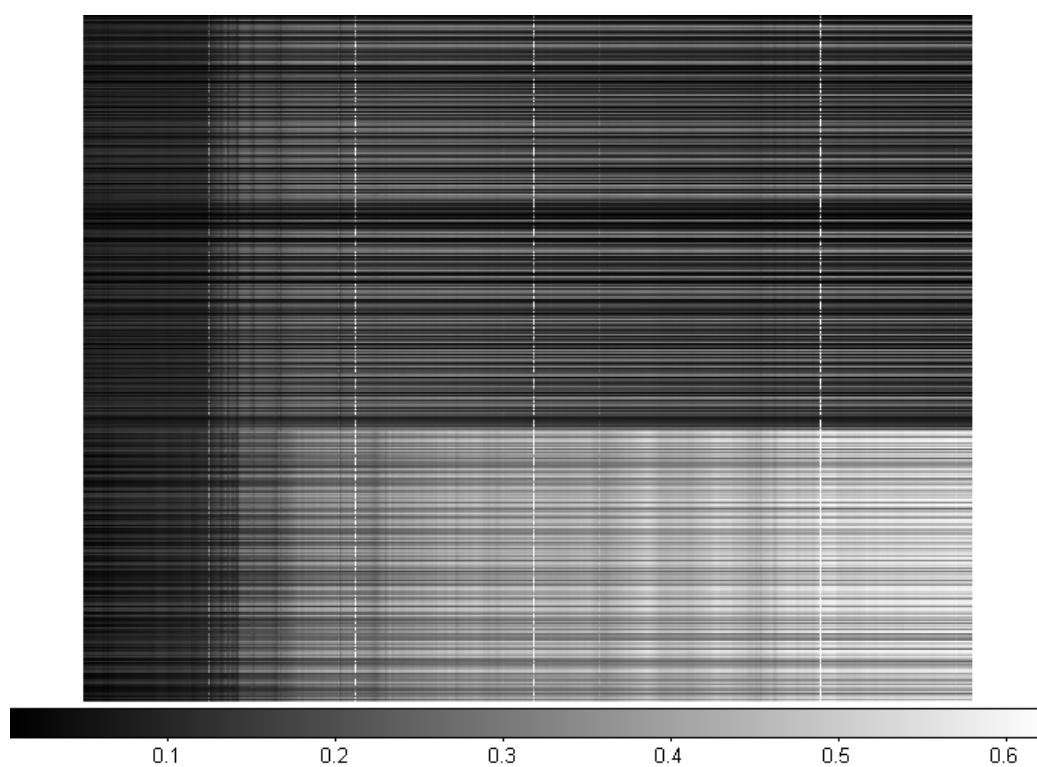
Σχήμα 2.41: Όμοια με το σχήμα 2.40, για τους γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και τους σπειροειδείς.



Σχήμα 2.42: Όμοια με το σχήμα 2.40, για τους ανώμαλους γαλαξίες και τους QSFG.



Σχήμα 2.43: Ένα δείγμα πέντε βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών, όπως αυτά αποτυπώνονται με τη βοήθεια του εργαλείου απεικόνισης της υπηρεσίας VizierR.



Σχήμα 2.44: Ένα τμήμα του καταλόγου των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών από το αντίστοιχο αρχείο spectra.fit.

τύπου, ανέρχεται σχεδόν στο ~ 100 % τόσο πριν όσο και μετά τη βελτιστοποίηση. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τα ρεαλιστικά προσομοιωμένα φάσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 2.45. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, οι προβλέψεις των φασματικών τύπων υπήρξαν αρκετά επιτυχείς. Εν γένει, η βελτιστοποίηση της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών βελτίωσε και την απόδοση του UGC. Ειδικά στην περίπτωση των προσομοιωμένων συνθετικών φασμάτων προγενέστερου φασματικού τύπου, η αύξηση της απόδοσης ανήλθε περίπου στο 25 %. Η ταξινόμηση των σπειροειδών προσομοιωμένων φασμάτων γαλαξιών, καθώς και των ανωμάτων γαλαξιών, βελτιώθηκε ελαφρώς (~ 3 %). Τέλος, η απόδοση του UGC στην ταξινόμηση των γαλαξιών QSFG, η οποία ήταν ήδη υψηλή, έμεινε πρακτικά αμετάβλητη. Τα αποτελέσματα αυτά αντανακλούν την εξάλειψη μεγάλου μέρους των αλληλεπικαλύψεων μεταξύ των διαφόρων φασματικών τύπων των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών, η οποία επιτεύχθηκε με τη βελτιστοποίηση της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα σε σχέση με την απόδοση του UGC στην παραμετροποίηση των καθαρών προσομοιωμένων φασμάτων, ορισμένη ως η διάμεσος τιμή των απόλυτων εκατοστιαίων σφαλμάτων που υπολογίστηκαν από τη σύγκριση μεταξύ των πραγματικών και των προβλεφθεισών τιμών των παραμέτρων, παρουσιάζονται στο σχήμα 2.46. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, οι περισσότερες παράμετροι υπολογίστηκαν με μεγαλύτερη ακρίβεια στα βέλτιστα προσομοιωμένα φάσματα σε σχέση με τα αρχικά φάσματα, αν και για κάποιες από αυτές η πρόβλεψη ήταν περισσότερο επιτυχής στα αρχικά προσομοιωμένα φάσματα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε κάποιες περιπτώσεις πρόβλεψης των τιμών παραμέτρων οι οποίες βρίσκονται κοντά στο μηδέν, η προβλεφθείσα τιμή μπορεί να είναι αρνητική, παρόλο που τόσο οι παράμετροι του ρυθμού αστρικής δημιουργίας, όσο και η απορρόφηση και η ερυθρομετατόπιση, είναι πάντα θετικές. Στις περιπτώσεις αυτές για την προβλεφθείσα παράμετρο ορίστηκε η τιμή μηδέν. Η ενσωμάτωση στο UGC της αντιμετώπισης των μη ρεαλιστικών προβλεφθεισών τιμών των διαφόρων παραμέτρων είναι σε εξέλιξη (Bellas-Velidis et al., 2010, 2012).

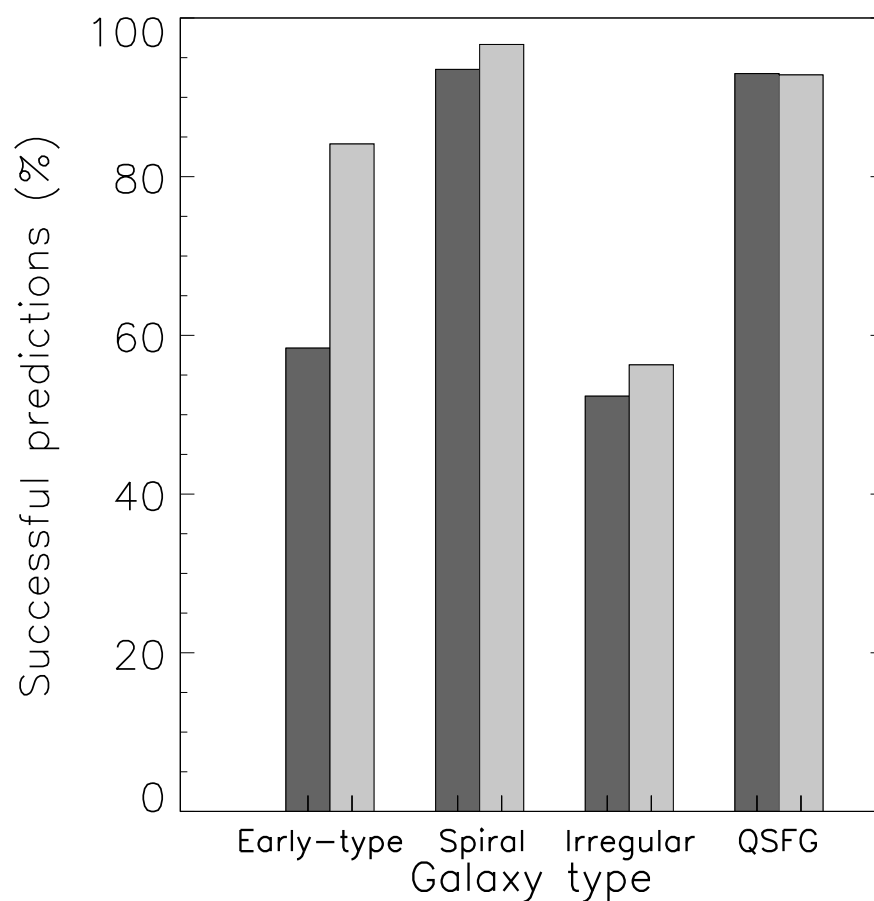
Όπως προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση, η βελτιστοποίηση της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών βελτίωσε εν γένει και την ικανότητα του UGC να προβλέπει τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων (σχήμα 2.46). Παρόλα αυτά, δεν είναι προφανής η αξιολόγηση των τιμών των σφαλμάτων, ειδικότερα όταν επιχειρείται σύγκριση μεταξύ διαφορετικών παραμέτρων. Από τη στιγμή που η μεταβολή των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας ώστε να κατασκευαστούν τα συνθετικά φάσματα δεν επιδρά γραμμικά στη μορφή των φασμάτων αυτών, οι συγκρίσεις θα πρέπει να γίνονται με ιδιαίτερη προσοχή.

Έτσι, αν για παράδειγμα η τελική μορφή ενός φάσματος δεν είναι ευαίσθητη στη μεταβολή της τιμής μίας συγκεκριμένης παραμέτρου του ρυθμού αστρικής

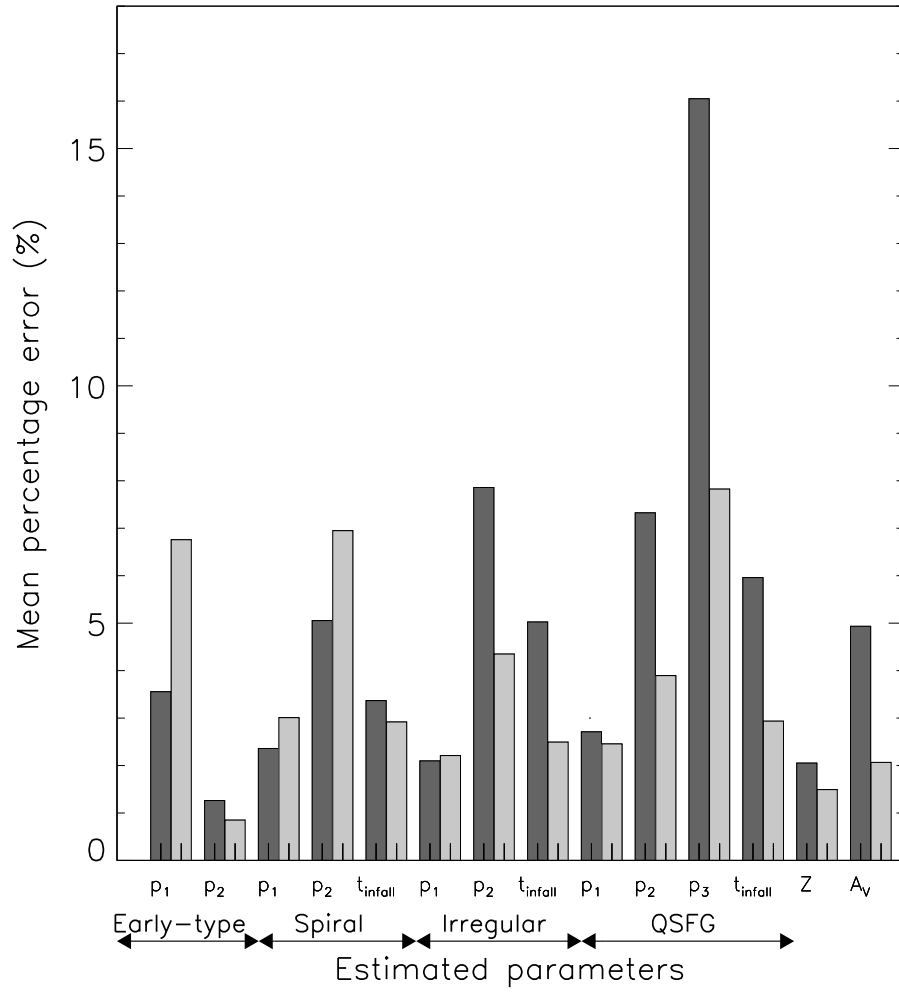
δημιουργίας για κάποιο εύρος τιμών της, ακόμα και ένα υψηλό σφάλμα στην πρόβλεψη της τιμής της θα μπορούσε να είναι αποδεκτό. Επιπροσθέτως, κάποια από τα φάσματα που αφαιρέθηκαν από την αρχική συνθετική βιβλιοθήκη στα πλαίσια της βελτιστοποίησής της, ενδέχεται να συνεισέφεραν σημαντικά στη φασματική ποικιλία της βιβλιοθήκης. Έτσι, η αφαίρεσή τους θα μπορούσε να έχει αρνητικά αποτελέσματα στην ικανότητα παραμετροποίησης του UGC.

Αυτό είναι φανερό στην περίπτωση της παραμέτρου p_1 των φασμάτων προγενέστερου φασματικού τύπου: Τα φάσματα του συγκεκριμένου φασματικού τύπου που περικόπηκαν από τη συνθετική βιβλιοθήκη είχαν δημιουργηθεί με την επιλογή υψηλής τιμής της παραμέτρου p_1 , γεγονός που προκάλούσε την εμφάνιση γραμμών εκπομπής σε αυτά. Αν και η αφαίρεσή τους ήταν επιθυμητή, η ποικιλία των συνθετικών φασμάτων προγενέστερου φασματικού τύπου μειώθηκε. Έτσι, παρόλο που για την εκπαίδευση της μεθόδου SVM θα μπορούσαν πλέον να χρησιμοποιηθούν περισσότερο ρεαλιστικά φάσματα, ήταν δυσκολότερο να διασυνδεθούν τα προσομοιωμένα φάσματα με τις αντίστοιχες τιμές της παραμέτρου p_1 , δυσχεραίνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την παραμετροποίηση.

Η ποιότητα της εκπαίδευσης του συστήματος UGC στο να παραμετροποιεί φάσματα και οι συνεπακόλουθες επιδόσεις του θα μπορούσαν επίσης να μειωθούν λόγω του μικρότερου αριθμού των βέλτιστων φασμάτων σε σχέση με τα αρχικά. Την ίδια στιγμή όμως, η πρόοδος στο σχεδιασμό και τη λειτουργία του UGC, όπως για παράδειγμα η εκπαίδευση των προσομοιωμένων φασμάτων σε διαφορετικά εύρη ερυθρομετατόπισης και απορρόφησης που έχει ήδη ενσωματωθεί στη λειτουργία του συστήματος UGC, μειώνουν τα σφάλματα και καθιστούν τον κώδικα περισσότερο αποδοτικό (Bellás-Velidis et al., 2012).



Σχήμα 2.45: Απόδοση του UGC στην ταξινόμηση των ρεαλιστικών προσομοιωμένων φασμάτων, ορισμένη ως το ποσοστό των επιτυχών προβλέψεων του φασματικού τύπου. Κάθε ζεύγος ράβδων αποδίδει τις επιτυχείς προβλέψεις του συγκεκριμένου φασματικού τύπου, πριν (αριστερή ράβδος) και μετά (δεξιά ράβδος) τη βελτιστοποίηση.



Σχήμα 2.46: Απόδοση του UGC στην παραμετροποίηση των καθαρών προσομοιωμένων φασμάτων, ορισμένη ως η διάμεσος τιμή των απόλυτων εκατοστιαίων σφαλμάτων παραμετροποίησης. Κάθε ζευγάρι ράβδων αποδίδει τα σφάλματα αυτά πριν (αριστερή ράβδος) και μετά (δεξιά ράβδος) τη βελτιστοποίηση, των εξής παραμέτρων: p_1 και p_2 των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου, p_1 , p_2 και t_{infall} των σπειροειδών γαλαξιών, p_1 , p_2 και t_{infall} των ανώμαλων γαλαξιών, p_1 , p_2 , p_3 και t_{infall} των ΧΣΦΓ, ερυθρομετατόπιση και απορρόφηση.

2.3 Νέα συνθετική βιβλιοθήκη

Η βελτιστοποίηση της βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών μέσω της διερεύνησης του ιστορικού αστρικής δημιουργίας των διαφόρων φασματικών τύπων και της εφαρμογής της στατιστικής μεθόδου PCA (Karampelas et al., 2012) οδήγησε στην καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το μοντέλο PÉGASE κατασκευάζει συνθετικά φάσματα. Η βελτιωμένη ικανότητα απόκτησης επιθυμητών συνθετικών φασμάτων γαλαξιών και η συνεχής ανάγκη δημιουργίας νέων, ρεαλιστικότερων φασμάτων για τις ανάγκες του συστήματος UGC, οδήγησαν στη δημιουργία της νέας συνθετικής βιβλιοθήκης.

Η προσομοίωση της συγκεκριμένης βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών αναμένεται να ολοκληρωθεί σύντομα, ώστε να ξεκινήσει η εκπαίδευση των κατάλληλων μοντέλων - SVM. Παράλληλα, έχει ήδη ξεκινήσει η στατιστική της ανάλυση και επεξεργασία. Παρακάτω περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της νέας βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών και, ειδικότερα, οι καινοτομίες τις οποίες εισάγει.

2.3.1 Παράμετροι ρυθμού αστρικής δημιουργίας

Η νέα βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων γαλαξιών δημιουργήθηκε με το μοντέλο φασματικής εξέλιξης γαλαξιών PÉGASE.2. Κατασκευάστηκαν εκ νέου φάσματα γαλαξιών που αντιστοιχούν στους αρχικούς φασματικούς τύπους, δηλαδή σε αυτούς των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου, των σπειροειδών γαλαξιών, των ανώμαλων γαλαξιών και των QSFG. Τα εύρη των τιμών των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_1 , p_2 , p_3 και t_{infall} είναι τα ίδια με εκείνα της συνθετικής βιβλιοθήκης των Tsalmantza et al. (2009), όπως παρατίθενται στον πίνακα 1.4, ενώ επιπλέον ελήφθησαν υπόψη τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της αρχικής συνθετικής βιβλιοθήκης (Karampelas et al., 2012). Έτσι, για κάθε παράμετρο του ρυθμού αστρικής δημιουργίας, το εύρος των τιμών της έχει διαχωριστεί σε επιμέρους υπο-εύρη. Για κάθε ένα από αυτά έχει κατασκευαστεί διαφορετικός αριθμός συνθετικών φασμάτων γαλαξιών, με τα περισσότερα να αντιστοιχούν στα βελτιστοποιημένα εύρη. Η κατανομή αυτή παρουσιάζεται στον πίνακα 2.10, για συγκεκριμένο εύρος ερυθρομετατόπισης και συγκεκριμένη γωνία κλίσης δίσκου (inclination), η οποία είναι παράμετρος εισόδου του μοντέλου PÉGASE που προσομοιώνει την εσωτερική απορρόφηση κάθε γαλαξία.

Πίνακας 2.10: Η κατανομή των γαλαξιών της νέας συνθετικής βιβλιοθήκης στα διάφορα επιμέρους εύρη των τιμών των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας, για συγκεκριμένο εύρος ερυθρομετατόπισης και κλίση γωνίας δίσκου.

Φασματικός τύπος	Παράμετρος	Εύρος τιμών	Αριθμός γαλαξιών
Γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου	p_1 (Myr)	10 - 2 000	800
		2 000 - 8 000	1 150
		8 000 - 18 000	950
		18 000 - 30 000	600
	p_2 ($M_\odot$)	0.2 - 1.5	3 500
		Μερικό σύνολο	3 500
Σπειροειδείς γαλαξίες	p_1	0.3 - 2.4	5000
	p_2 ($Myr/M_\odot$)	5 - 4 000	1 650
		4 000 - 10 000	1 250
		10 000 - 30 000	2 100
	t_{infall} (Myr)	5 - 3 000	1 850
		3 000 - 10 000	2 200
		10 000 - 16 000	950
			Μερικό σύνολο
	Ανώμαλοι γαλαξίες	p_1	0.6 - 3.9
p_2 ($Myr/M_\odot$)		4 000 - 6 000 $Myr/M_\odot$	550
		6 000 - 10 000	550
		10 000 - 22 000	800
		22 000 - 70 000	1 600
t_{infall} (Myr)		5 000 - 10 000 Myr	1 600
		10 000 - 14 000	650
		14 000 - 30 000	1 250
			Μερικό σύνολο
QSFG	p_1	0.6 - 3.9	5 000
	p_2 ($Myr/M_\odot$)	4 000 - 6 000 $Myr/M_\odot$	775
		6 000 - 10 000	775
		10 000 - 22 000	1 150
		22 000 - 70 000	2 300
	p_3 (Myr)	1 - 4	2 250
		4 - 10	1 650
		10 - 250	1 100
	t_{infall} (Myr)	5 000 - 10 000 Myr	2 300
		10 000 - 14 000	900
		14 000 - 30 000	1 800
			Μερικό σύνολο
	Σύνολο	17 000	

2.3.2 Εξελικτική διόρθωση

Τα φάσματα δημιουργήθηκαν στην ηλικία που αντιστοιχεί στην τιμή της ερυθρομετατόπισης που τα χαρακτηρίζει, έγινε δηλαδή εξελικτική διόρθωση (evolutionary correction/e-correction). Όσο μεγαλύτερη η τιμή της ερυθρομετατόπισης, σε τόσο νεαρότερη ηλικία ελήφθη το αντίστοιχο φάσμα. Στο σχήμα 2.47 απεικονίζεται ο συσχετισμός κοσμικού χρόνου - ερυθρομετατόπισης, κανονικοποιημένος για την περίπτωση των γαλαξιών της νέας συνθετικής βιβλιοθήκης σε ηλικία σύμπαντος 13 Gyr για τους γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και τους σπειροειδείς γαλαξίες, και σε ηλικία σύμπαντος 9 Gyr για τους ανώμαλους γαλαξίες και τους QSFG. Ο αντίστοιχος τύπος (cosmic time - redshift relation) που συνδέει τον κοσμικό χρόνο t με την ερυθρομετατόπιση z είναι (Longair, 2008)

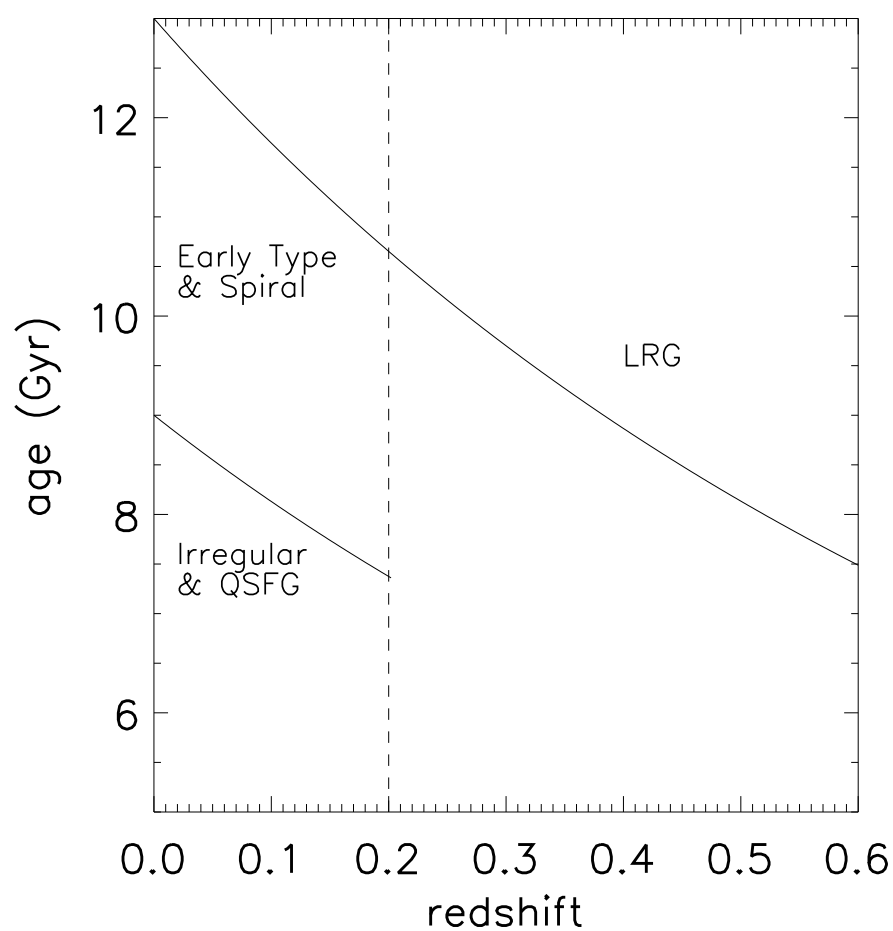
$$t = \frac{2}{3H_0\Omega_\Lambda^{1/2}} \ln \left(\frac{1 + \cos\theta}{\sin\theta} \right) \quad (2.3.1)$$

όπου

$$\tan \theta = \left(\frac{\Omega_0}{\Omega_\Lambda} \right)^{1/2} (1 + z)^{1/2} \quad (2.3.2)$$

με $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$, $\Omega_0 = 0.3$ και $\Omega_\Lambda = 0.7$.

Στον πίνακα 2.11 παρουσιάζονται ενδεικτικά μερικές αντιστοιχίες ερυθρομετατόπισης - ηλικίας, κανονικοποιημένες για την περίπτωση της νέας βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. Στον ίδιο πίνακα περιλαμβάνονται και οι περιπτώσεις με $z = 0.4$ και $z = 0.6$, οι οποίες αναφέρονται στην ειδική περίπτωση των LRG.



Σχήμα 2.47: Η σχέση κοσμικού χρόνου - ερυθρομετατόπισης, κανονικοποιημένη για την περίπτωση των γαλαξιών της νέας συνθετικής βιβλιοθήκης.

Πίνακας 2.11: Ενδεικτικές αντιστοιχίες ερυθρομετατόπισης - ηλικίας, κανονικοποιημένες για την περίπτωση της νέας βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. Οι αντιστοιχίες όπου $z = 0.4$ και $z = 0.6$ αναφέρονται στην ειδική περίπτωση των LRG.

Ερυθρομετατόπιση z	Ηλικία (Myr) [γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και σπειροειδείς]	Ηλικία (Myr) [ανώμαλοι γαλαξίες και QSFG]
0.00	13 000	9 000
0.05	12 350	8 550
0.10	11 744	8 130
0.15	11 179	7 739
0.20	10 652	7 375
0.40	8 867	
0.60	7 488	

2.3.3 Εσωτερική απορρόφηση

Δημιουργήθηκαν συνθετικά φάσματα σπειροειδών και ανώμαλων γαλαξιών και QSFG με διάφορες τιμές κλίσης του «δίσκου» στον οποίο προσομοιώνονται, ώστε να αποδοθεί περισσότερο ρεαλιστικά η απορρόφηση στο εσωτερικό των γαλαξιών αυτών. Στις προηγούμενες βιβλιοθήκες συνθετικών φασμάτων γαλαξιών είχε χρησιμοποιηθεί μία μέση γωνία κλίσης. Στη νέα βιβλιοθήκη χρησιμοποιήθηκαν, πέραν της μέσης κλίσης, και οι τιμές $i = 0^\circ$ (face-on), $i = 30^\circ$, $i = 60^\circ$ και $i = 90^\circ$ (edge-on). Υπενθυμίζεται ότι οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου προσομοιώνονται ως σφαιρικά σώματα, άρα δεν έχει νόημα η απόδοση γωνίας κλίσης δίσκου.

2.3.4 Λαμπροί κόκκινοι γαλαξίες

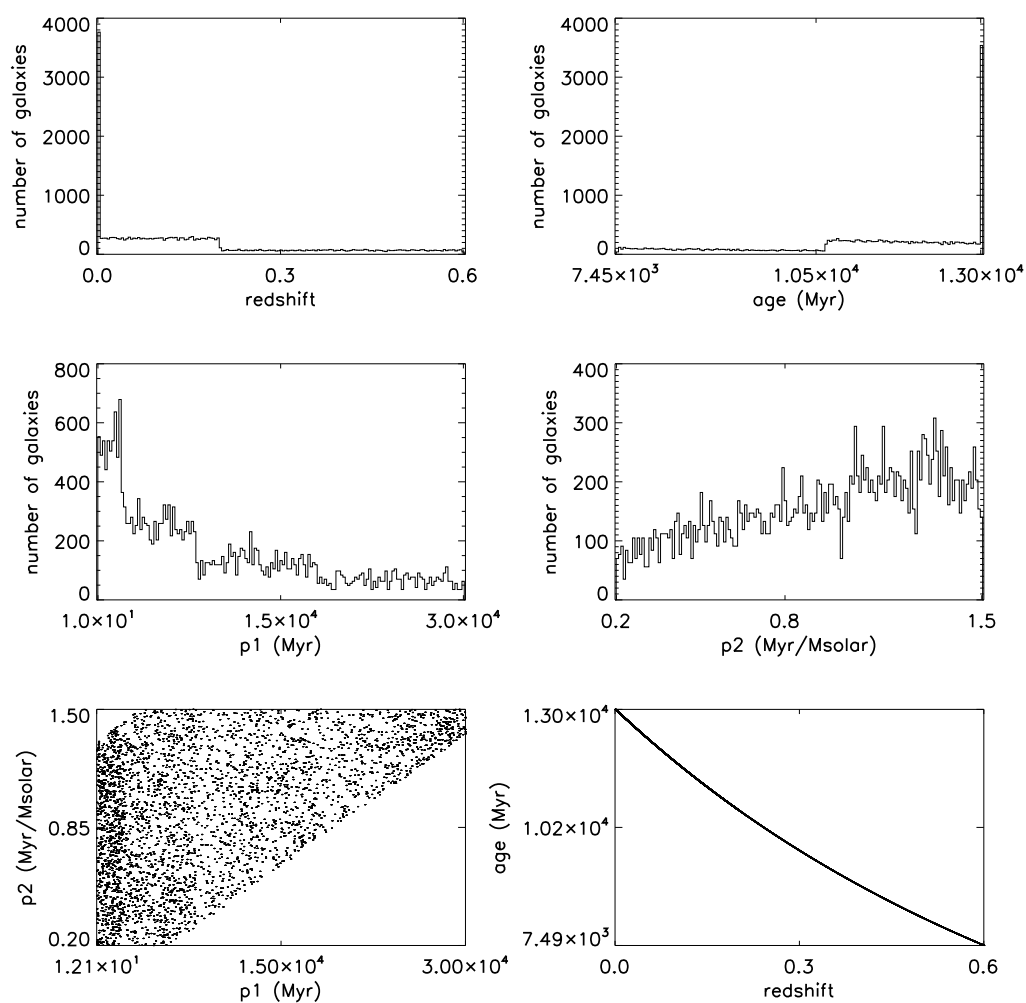
Οι λαμπροί κόκκινοι γαλαξίες (Luminous Red Galaxies - LRG) είναι μακρινοί αλλά ιδιαίτερα λαμπροί, και επομένως μπορούν να παρατηρηθούν από τον δορυφόρο Gaia. Τα γιγάντια αυτά αντικείμενα με τον γηραιό πληθυσμό και την έντονη φασματική ασυνέχεια στα $4000 \text{ \AA}$, είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στη μελέτη της εξέλιξης των ελλειπτικών γαλαξιών, στον προσδιορισμό κοσμολογικών παραμέτρων και στη μελέτη των γαλαξιακών σμηνών (Gladders and Yee, 2000; Eisenstein et al., 2001, 2005). Η ενσωμάτωσή τους στις διαδικασίες εκπαίδευσης συνθετικών φασμάτων του συστήματος UGC αποσκοπεί στη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση της τεράστιας βάσης δεδομένων που θα προσφέρει η διαστημική αποστολή Gaia.

Έτσι, δημιουργήθηκαν συνθετικά φάσματα γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου για τιμές της ερυθρομετατόπισης όχι μόνο έως το προσεγγιστικό όριο του δορυφόρου Gaia για τους ομαλούς γαλαξίες ($z = 0.2$), αλλά και πέρα από αυτό. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάστηκαν συνθετικά φάσματα γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου και για τιμές της ερυθρομετατόπισης από 0.2 έως 0.6. Υπενθυμίζεται πως με την εξελικτική διόρθωση που εφαρμόζεται στα φάσματα της νέας βιβλιοθήκης, τα τελικά φάσματα των γαλαξιών LRG αντιστοιχούν σε νεαρότερη ηλικία από τα υπόλοιπα φάσματα προγενέστερου φασματικού τύπου, αλλά και των υπολοίπων φασματικών τύπων γενικότερα.

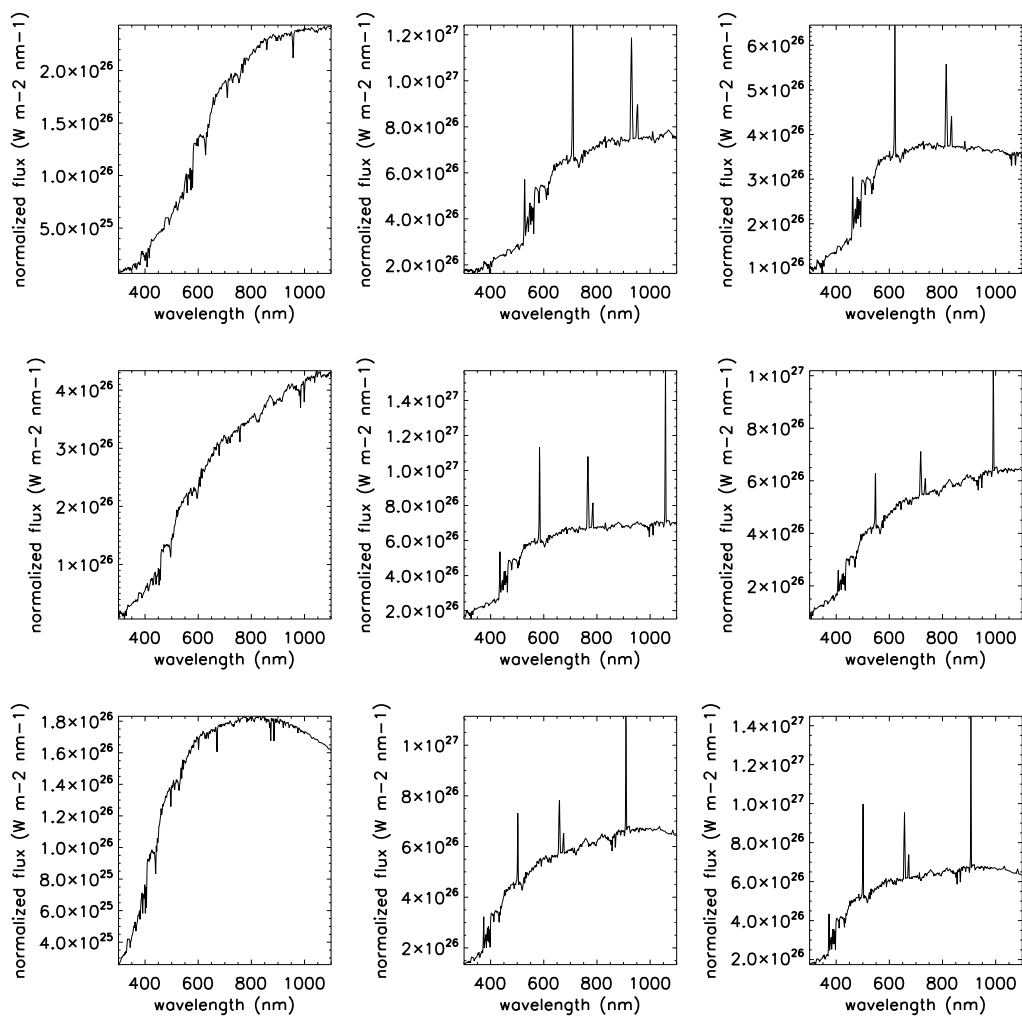
2.3.5 Τελική βιβλιοθήκη

Η νέα συνθετική βιβλιοθήκη περιέχει συνθετικά φάσματα με (α) παραμέτρους συνεπείς με τη διαδικασία βελτιστοποίησης των συνθετικών φασμάτων, (β) την ειδική περίπτωση των LRG, (γ) περισσότερες περιπτώσεις εσωτερικής απορρόφησης, και (δ) εξελικτική διόρθωση. Οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου δημιουργήθηκαν για τυχαίες τιμές της ερυθρομετατόπισης στο εύρος 0.0 - 0.6. Επιπλέον, κατασκευάστηκε και ένα δείγμα γαλαξιών με μηδενική ερυθρομετατόπιση. Οι σπειροειδείς γαλαξίες δημιουργήθηκαν για τυχαίες τιμές της ερυθρομετατόπισης στο εύρος 0.0 - 0.2 και για πέντε τιμές της γωνίας κλίσης. Επίσης, κατασκευάστηκε και ένα δείγμα γαλαξιών με μηδενική ερυθρομετατόπιση και μέση γωνία κλίσης. Οι ανώμαλοι γαλαξίες και οι QSFG κατασκευάστηκαν όπως και οι σπειροειδείς.

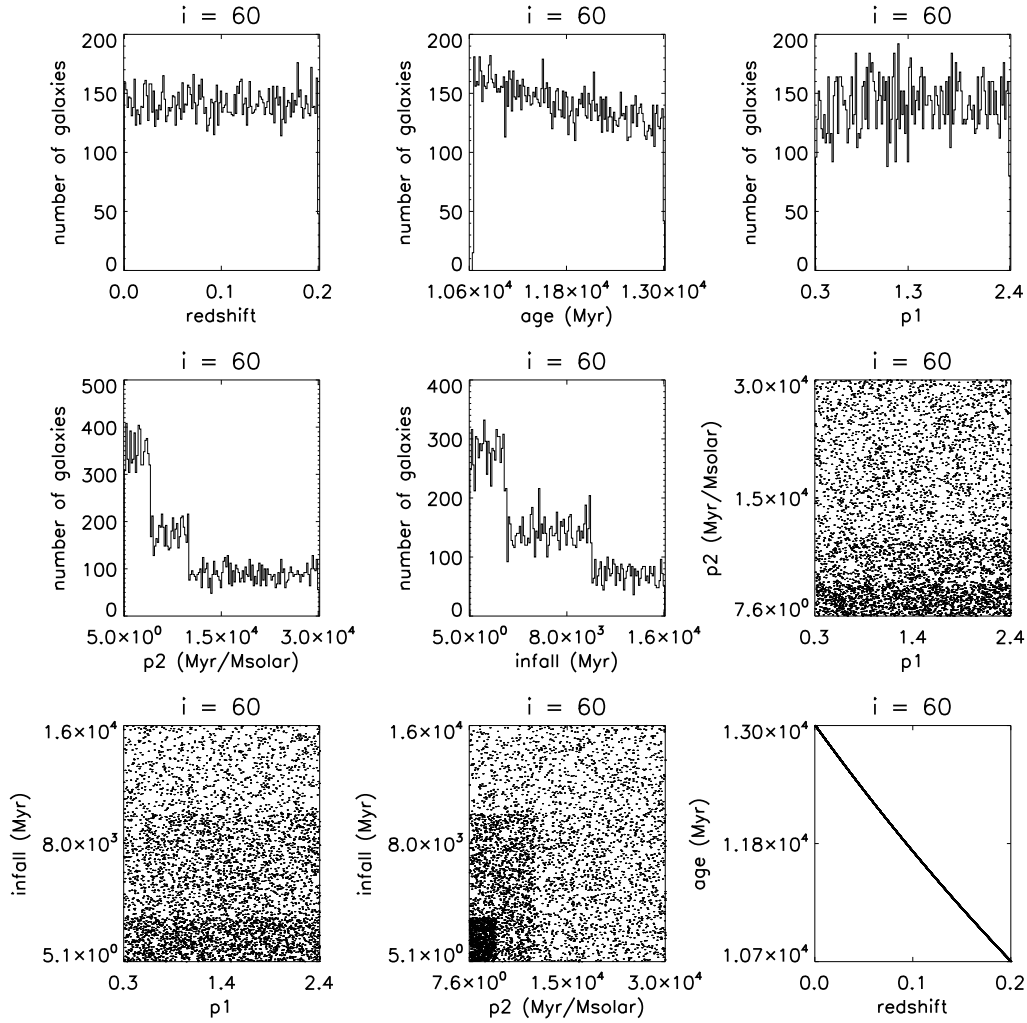
Στις εικόνες 2.48, 2.50, 2.52 και 2.54 παρουσιάζονται ιστογράμματα και διαγράμματα των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου, των σπειροειδών γαλαξιών, των ανώμαλων γαλαξιών και των QSFG. Πιο συγκεκριμένα, απεικονίζονται τα ιστογράμματα των τιμών της ερυθρομετατόπισης, της ηλικίας που αντιστοιχεί σε κάθε τιμή της ερυθρομετατόπισης και των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας, καθώς και τα διαγράμματα που συσχετίζουν τις παραμέτρους αυτές μεταξύ τους και την ηλικία με την ερυθρομετατόπιση. Στις εικόνες 2.49, 2.51, 2.53 και 2.55 παρουσιάζεται ένα δείγμα φασμάτων για κάθε έναν από τους παραπάνω φασματικούς τύπους.



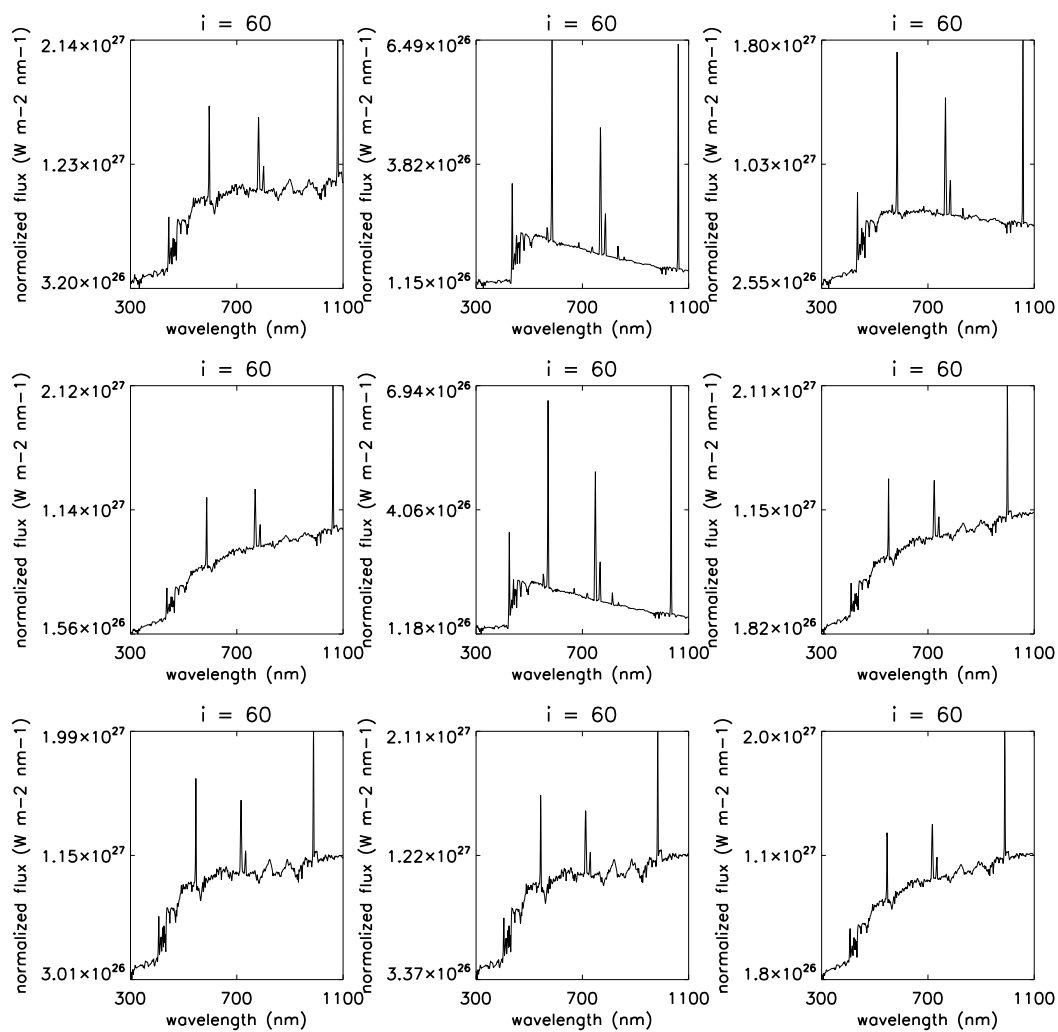
Σχήμα 2.48: Ιστογράμματα και διαγράμματα που χαρακτηρίζουν τα συνθετικά φάσματα των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου της νέας βιβλιοθήκης.



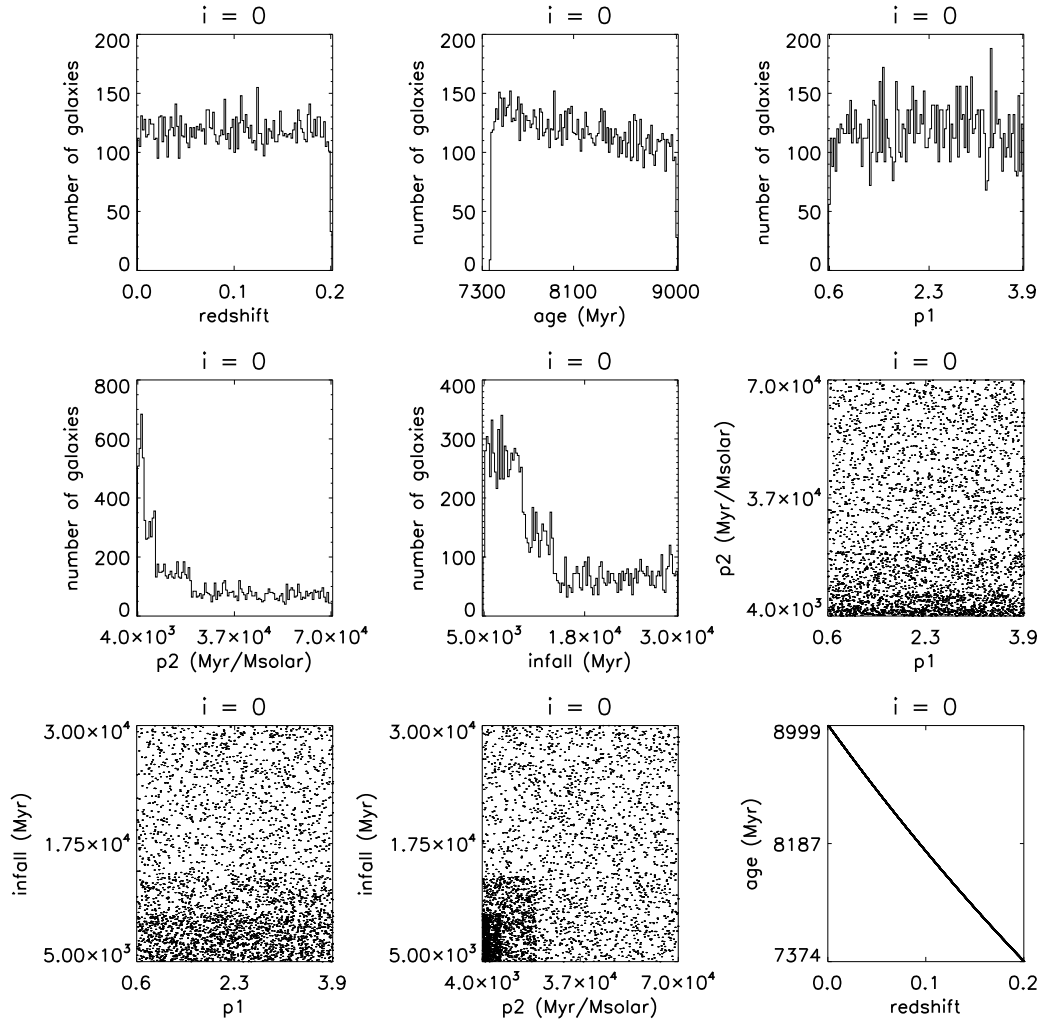
Σχήμα 2.49: Δείγμα φασμάτων των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου της νέας βιβλιοθήκης.



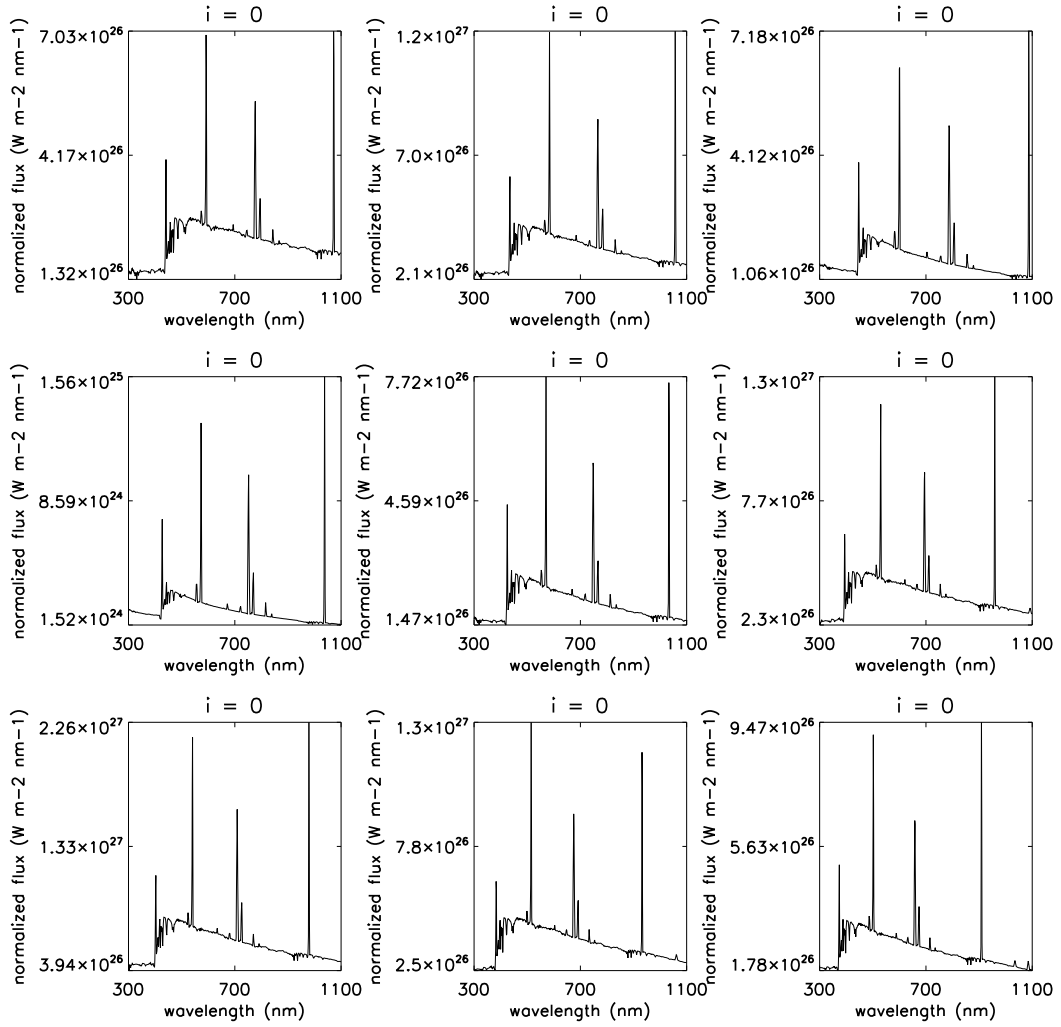
Σχήμα 2.50: Ιστογράμματα και διαγράμματα που χαρακτηρίζουν τα συνθετικά φάσματα των σπειροειδών γαλαξιών της νέας βιβλιοθήκης, για γωνία κλίσης $i = 60^\circ$.



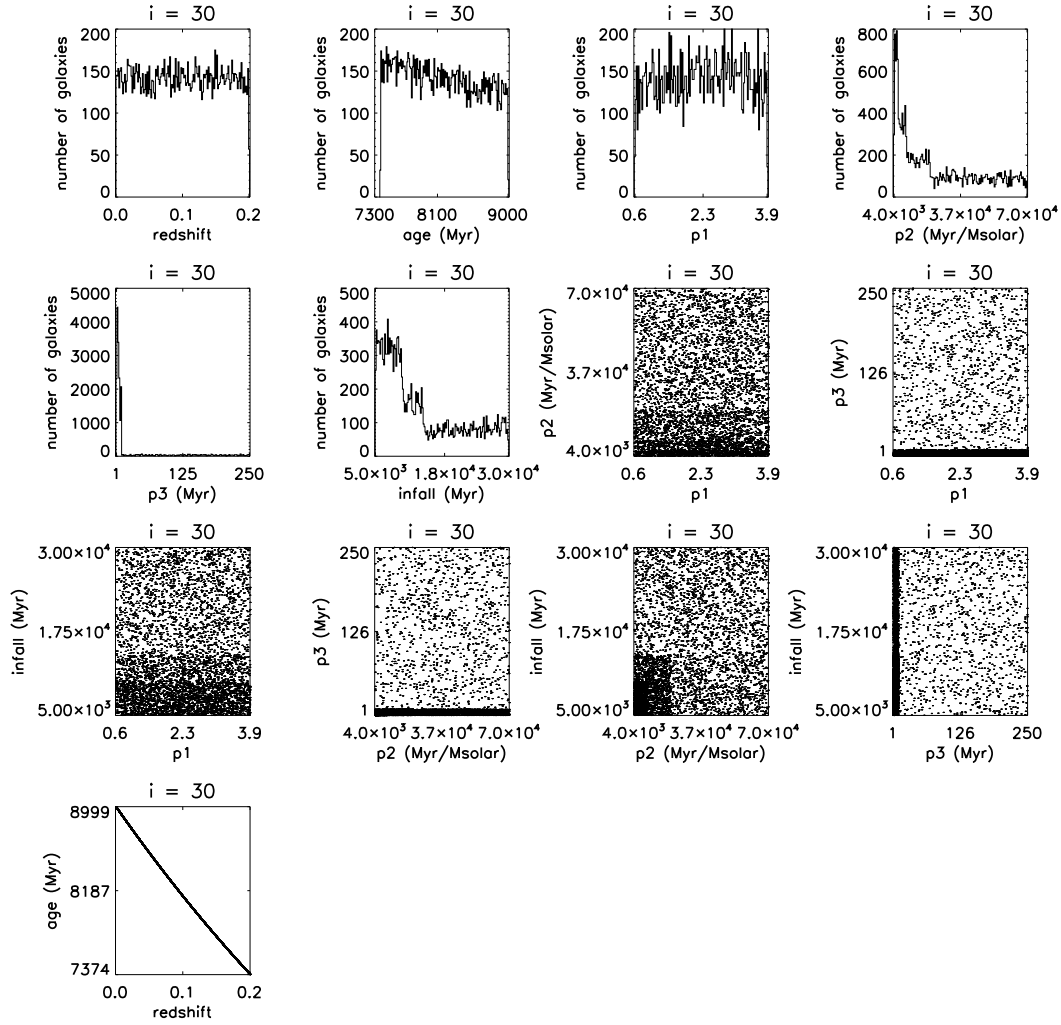
Σχήμα 2.51: Δείγμα φασμάτων των σπειροειδών γαλαξιών της νέας βιβλιοθήκης, για γωνία κλίσης $i = 60^\circ$.



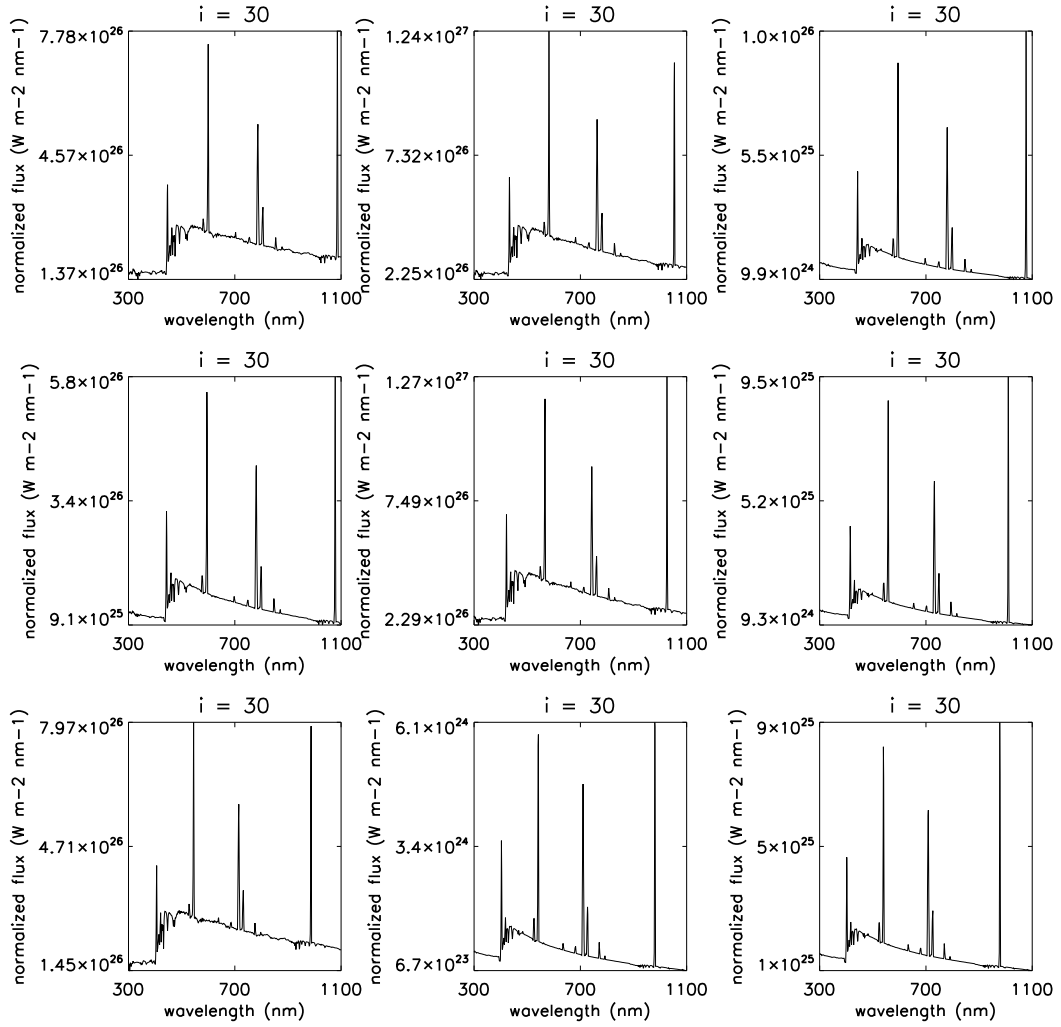
Σχήμα 2.52: Ιστογράμματα και διαγράμματα που χαρακτηρίζουν τα συνθετικά φάσματα των ανώμαλων γαλαξιών της νέας βιβλιοθήκης, για γωνία κλίσης $i = 0^\circ$.



Σχήμα 2.53: Δείγμα φασμάτων των ανώμαλων γαλαξιών της νέας βιβλιοθήκης, για γωνία κλίσης $i = 0^\circ$.



Σχήμα 2.54: Ιστογράμματα και διαγράμματα που χαρακτηρίζουν τα συνθετικά φάσματα των QSGF της νέας βιβλιοθήκης, για γωνία κλίσης $i = 30^\circ$.



Σχήμα 2.55: Δείγμα φασμάτων των QSGF της νέας βιβλιοθήκης, για γωνία κλίσης $i = 30^\circ$.

2.4 Συνθετικά φάσματα γαλαξιών με επεισοδιακή αστρογέννεση

Η απόκτηση νέων, ρεαλιστικότερων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί μόνο με τη βελτιστοποίηση των ήδη χρησιμοποιηθέντων σεναρίων αστρικής δημιουργίας. Νέα ιστορικά αστρογέννεσης μπορούν να κατασκευαστούν, να υλοποιηθούν και να αξιολογηθούν, πάντα σε σύγκριση με παρατηρηθέντα φάσματα γαλαξιών και σε αντιστοιχία με προηγούμενες ερευνητικές προσπάθειες. Πολλές από τις έρευνες αυτές μελετούν την αστρική δημιουργία με επεισόδια αστρογέννεσης (episodic star formation). Κατά την επεισοδιακή αστρογέννεση τα άστρα γεννιούνται κατά τη διάρκεια εξάρσεων αστρικής δημιουργίας (bursts), όπου είτε η μία έξαρση διαδέχεται την άλλη είτε μεταξύ των εξάρσεων η αστρική δημιουργία παραμένει ασθενής. Η επεισοδιακή αστρική δημιουργία φαίνεται να εφαρμόζεται με μεγαλύτερη επιτυχία στην περίπτωση των νάνων γαλαξιών, χωρίς η σχετική μελέτη να περιορίζεται μόνο σε αυτούς (Smecker-Hane et al., 1996; Mateo, 1998; Stinson et al., 2007; Quillen and Bland-Hawthorn, 2008).

2.4.1 Σενάρια επεισοδιακής αστρογέννεσης

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής διερευνήθηκαν και στη συνέχεια κατασκευάστηκαν σενάρια επεισοδιακής αστρικής δημιουργίας γαλαξιών. Τα σενάρια αυτά αντιμετωπίστηκαν ως παραλλαγή του εν χρήση σεναρίου των ανώμαλων γαλαξιών. Έτσι, οι προς δημιουργία συνθετικοί γαλαξίες θα έχουν ηλικία 9 Gyr και η κατανάλωση του διαθέσιμου αερίου θα ανήκει στην ίδια τάξη μεγέθους με την αντίστοιχη των ανώμαλων γαλαξιών. Επειδή όμως έχουν κατασκευαστεί συνθετικά φάσματα ανώμαλων γαλαξιών που αντιστοιχούν σε διάφορα εύρη των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας, υφίσταται εκ των πραγμάτων και μία ποικιλία στην ποσότητα του καταναλωθέντος αερίου. Συνεπώς, η ποσότητα του καταναλωθέντος αερίου στην περίπτωση των σεναρίων επεισοδιακής αστρογέννεσης θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτική της περίπτωσης των ανώμαλων γαλαξιών.

Για την κατασκευή των σεναρίων επεισοδιακής αστρικής δημιουργίας ορίζονται τρεις παράμετροι που ελέγχουν το ρυθμό αστρικής δημιουργίας: (α) ο αριθμός των εξάρσεων/συμβάντων αστρογέννεσης N (Number of bursts), (β) η ηλικία του γαλαξία κατά την έναρξη κάθε έξαρσης A_i , όπου $i = 1, \dots, N$ (Age), (γ) η διάρκεια κάθε έξαρσης D_i , όπου $i = 1, \dots, N$ (Duration), και (δ) η καταναλωθείσα κανονικοποιημένη ποσότητα αερίου σε κάθε έξαρση M_i , όπου $i = 1, \dots, N$ (normalized Mass of the gas). Η ποσότητα αυτή ορίζεται ως ένα πολλαπλάσιο της συνολικής αντίστοιχης ποσότητας που καταναλώνεται σε ένα

σενάριο ανώμαλου γαλαξία.

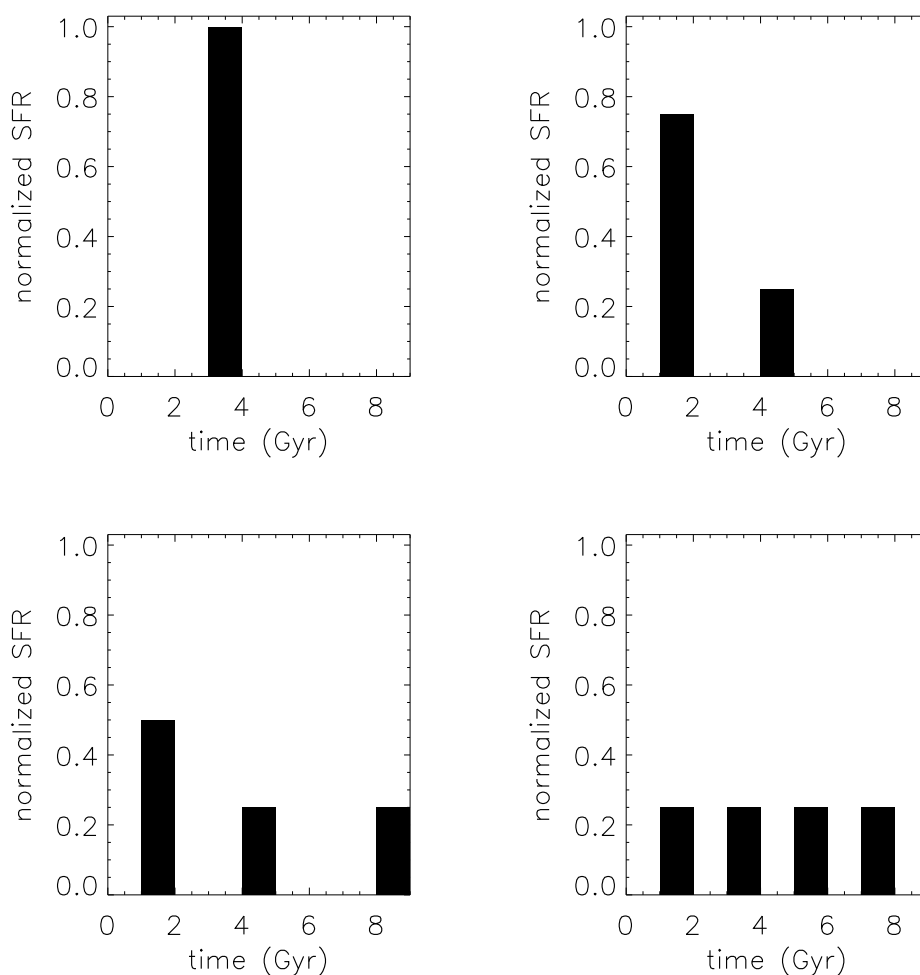
Σε πρώτη φάση, απαιτείται η δημιουργία ενός αρχικού σετ συνθετικών φασμάτων γαλαξιών επεισοδιακής αστρογέννησης, το οποίο στη συνέχεια θα αξιολογηθεί. Έτσι, είναι επιθυμητό να περιοριστεί η όποια πολυπλοκότητα των αντίστοιχων σεναρίων στον ελάχιστο βαθμό, ούτως ώστε να αξιολογηθούν ευκολότερα. Η διαδικασία αυτή θα αποτελέσει στη συνέχεια τον οδηγό για την κατασκευή νέων, πολυπλοκότερων και ρεαλιστικότερων σεναρίων. Ούτως ή άλλως τίθενται και παρατηρησιακοί περιορισμοί οι οποίοι εμποδίζουν την ανίχνευση πολλαπλών και ποικίλων μορφών εξάρσεων αστρογέννησης, με αποτέλεσμα τα παρατηρηθέντα σχετικά σενάρια να προσομοιώνονται με απλά θεωρητικά σενάρια (Mateo, 1998). Στο πνεύμα αυτό λοιπόν, γίνεται χρήση των εξής περιορισμών:

1. Κάθε συμβάν αστρογέννησης ξεκινά σε ακέραια τιμή της ηλικίας του γαλαξία ($A_i = 0 \text{ Gyr}, 1 \text{ Gyr}, \dots$).
2. Κάθε συμβάν αστρογέννησης διαρκεί 1 Gyr ($D_i = 1 \text{ Gyr}$).
3. Η χρονική διάρκεια ανάμεσα σε δύο συμβάντα αστρογέννησης είναι τουλάχιστον 1 Gyr.
4. Σε κάθε συμβάν αστρογέννησης ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας είναι σταθερός.
5. Σε κάθε συμβάν αστρογέννησης καταναλώνεται ποσότητα αερίου ίση με το ένα τέταρτο, το ήμισυ, τα τρία τέταρτα και το σύνολο της αντίστοιχης κανονικοποιημένης ποσότητας ενός ανώμαλου γαλαξία.

Ο πίνακας 2.12 παραθέτει εποπτικά τις παραπάνω ορισθείσες παραμέτρους του ρυθμού αστρικής δημιουργίας N , D_i και M_i . Στο σχήμα 2.56 παρουσιάζονται τέσσερα διαφορετικά σενάρια των γαλαξιών επεισοδιακής αστρογέννησης. Για παράδειγμα, το σενάριο που απεικονίζεται στο επάνω δεξιά τμήμα του σχήματος 2.56, αντιστοιχεί στις παρακάτω παραμέτρους αστρικής δημιουργίας: $N = 2$, $A_1 = 1 \text{ Gyr}$, $A_2 = 4 \text{ Gyr}$, $D_1 = 1 \text{ Gyr}$, $M_1 = 0.75$ και $M_2 = 0.25$. Με βάση τους περιορισμούς στους οποίους υπόκεινται τα σενάρια αστρικής δημιουργίας των συνθετικών γαλαξιών επεισοδιακής αστρογέννησης, σε κάθε επιλεγμένη καταναλωθείσα ποσότητα αερίου του σεναρίου των ανώμαλων γαλαξιών, αντιστοιχούν 240 πρότυπα σενάρια επεισοδιακής αστρογέννησης. Αυτό καταδεικνύει την πολυπλοκότητα των πολυπαραμετρικών σεναρίων αστρικής δημιουργίας, καθώς και τη χρησιμότητα στατιστικών μεθόδων όπως η PCA. Η δημιουργία των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών επεισοδιακής αστρογέννησης με το μοντέλο PÉGASE βρίσχεται σε εξέλιξη.

Πίνακας 2.12: Οι παράμετροι του ρυθμού αστρικής δημιουργίας του σεναρίου των γαλαξιών επεισοδιακής αστρογέννεσης και οι τιμές που δύνανται να λάβουν.

Παράμετρος ρυθμού αστρικής δημιουργίας	Τιμές
N	1 - 4
A_i (Gyr)	0 - 8
D_i (Gyr)	1
M_i	0.25, 0.50, 0.75, 1.00



Σχήμα 2.56: Διαφορετικά σενάρια των γαλαξιών επεισοδιακής αστρογέννεσης.

2.5 Συνθετική βιβλιοθήκη υψηλής διακριτικής ικανότητας

Η ανάγκη δημιουργίας νέων, ρεαλιστικότερων φασμάτων δεν περιορίζεται μόνο στην περίπτωση των φωτομέτρων BP/RP του δορυφόρου Gaia. Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα των ερευνών σχετικά με τη συνθετική και τη νέα συνθετική βιβλιοθήκη φασμάτων γαλαξιών μπορούν να αξιοποιηθούν για τη δημιουργία μίας βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών υψηλής διακριτικής ικανότητας για τον φασματογράφο RVS. Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι σε εξέλιξη (Rocca-Volmerange et al., 2011). Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σχετική διερεύνηση και τα αντίστοιχα αποτελέσματα, αφού πρώτα παρατεθούν κάποιες χρήσιμες ερευνητικές προσπάθειες που αφορούν την τριπλέτα ασβεστίου, το σημαντικότερο φασματικό χαρακτηριστικό στο εύρος μηκών κύματος του φασματογράφου RVS.

2.5.1 Τριπλέτα ασβεστίου (CaII)

Η τριπλέτα του ασβεστίου Ca II ανιχνεύεται κυρίως στα φάσματα των ψυχρών αστέρων και αποτελείται από τις γραμμές Ca1 (8498.02 Å), Ca2 (8542.09 Å) και Ca3 (8662.14 Å). Μελετάται εντατικά σε γαλαξίες και ιδιαίτερα σε ελλειπτικούς και νάνους ελλειπτικούς γαλαξίες, οι οποίοι διαθέτουν κυρίως γηραιό αστρικό πληθυσμό (Saglia et al., 2002; Michielsen et al., 2003, 2007; Thomas et al., 2003; Cenarro et al., 2004), αλλά και στην περίπτωση ενεργών γαλαξιών, όπως οι Seyferts και οι starbursts (Garcia-Rissmann et al., 2005). Παράλληλα, βρίσκεται σε εξέλιξη ο ορισμός νέων φασματικών δεικτών (spectral indices) που αφορούν την τριπλέτα ασβεστίου, παρουσιάζονται νέες βιβλιοθήκες αστρικών φασμάτων στη συγκεκριμένη φασματική παριοχή της τριπλέτας και, κατά συνέπεια, δημιουργούνται και μοντέλα σύνθεσης αστρικών πληθυσμών (stellar population synthesis models), ικανά να χρησιμοποιηθούν στη δημιουργία φασμάτων αστρικών σημνών και γαλαξιών (Cenarro et al., 2001a,b, 2002; Vazdekis et al., 2003). Να σημειωθεί πως η ανίχνευση της τριπλέτας του ασβεστίου στα φάσματα των αντικειμένων που πρόκειται να παρατηρήσει ο δορυφόρος Gaia προϋποθέτει τα αντικείμενα αυτά να έχουν χαμηλή ερυθρομετατόπιση, ώστε το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό να είναι ορατό στο στενό φασματικό εύρος του οργάνου RVS.

2.5.2 Αστρικές βιβλιοθήκες υψηλής διακριτικής ικανότητας

Η δημιουργία μίας βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών με τον κώδικα PÉGASE για τις ανάγκες του φασματογράφου RVS απαιτεί τη χρήση μίας αντίστοιχης βιβλιοθήκης αστρικών φασμάτων υψηλής διακριτικής ικανότητας, καθώς η υπάρχουσα βιβλιοθήκη BaSeL (Lejeune et al., 1997, 1998) την οποία χρησιμοποιεί ο κώδικας PÉGASE είναι χαμηλής ανάλυσης. Έχουν δημιουργηθεί πολλές σχετικές αστρικές βιβλιοθήκες, όπου ενδεικτικά αναφέρονται των Pickles (1998), Murphy and Meiksin (2004), Valdes et al. (2004), Coelho et al. (2005) και Munari et al. (2005), ενώ έχουν πραγματοποιηθεί και συγκρίσεις μεταξύ τους (Bertone, 2005; Martins and Coelho, 2007). Από τις διαθέσιμες αστρικές βιβλιοθήκες υψηλής διακριτικής ικανότητας επιλέχθηκε εκείνη των Munari et al. (2005), η οποία άλλωστε κατασκευάστηκε, μεταξύ άλλων, και για τον φασματογράφο RVS.

Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη έχει δημιουργηθεί σε έξι διαφορετικές εκδοχές ισάριθμων διαφορετικών αναλύσεων. Οι εκδοχές αυτές είναι οι εξής:

- Ανάλυση $R = 20000$
- Ανάλυση $R = 11500$ για την αποστολή Gaia
- Ανάλυση $R = 8500$ για το πρόγραμμα RAVE
- Ανάλυση $R = 2000$ για το πρόγραμμα SLOAN
- Σταθερή διασπορά $1 \text{ \AA}/\text{pix}$
- Σταθερή διασπορά $10 \text{ \AA}/\text{pix}$

Η εκδοχή της βιβλιοθήκης συνθετικών αστρικών φασμάτων που επιλέχθηκε να εισαχθεί στο PÉGASE είναι εκείνη με τη σταθερή διασπορά του $1 \text{ \AA}/\text{pix}$, η οποία είναι και δημοσίως διαθέσιμη.

Η κάλυψη από τη βιβλιοθήκη των Munari et al. (2005) των χαρακτηριστικών παραμέτρων από τους οποίους καθορίζεται η τελική μορφή των αστρικών φασμάτων, δηλαδή η θερμοκρασία, η επιφανειακή βαρύτητα και η μεταλλικότητα, είναι αρκετά εκτενής και αντιπροσωπευτική για το σύνολό τους. Επιπλέον, η βιβλιοθήκη κατασκευάστηκε παράλληλα και για πολυάριθμους συνδυασμούς α -enhancement, ταχυτήτων περιστροφής και ταχυτήτων τυρβώδους ροής μικρής κλίμακας (micro-turbulent velocity). Από την άλλη μεριά, στα μειονεκτήματά της προσμετράται και η έλλειψη συνθετικών φασμάτων αστερών οι οποίοι είναι ψυχρότεροι των $3\,500 \text{ K}$, οι οποίοι συνεισφέρουν σημαντικά στη

μορφή ενός φάσματος γαλαξία. Οι περισσότερες όμως από τις διαθέσιμες βιβλιοθήκες συνθετικών φασμάτων αστέρων υψηλής διακριτικής ικανότητας είτε χαρακτηρίζονται από μία αντίστοιχη έλλειψη «ψυχρών» φασμάτων, είτε η κάλυψη των υπολοίπων παραμέτρων, πέραν της θερμοκρασίας, δεν είναι επαρκής για την περίπτωση του φασματογράφου RVS. Η σταθερή διασπορά του 1 Å/pix της επιλεγμένης βιβλιοθήκης είναι χαμηλότερης ανάλυσης από εκείνη του RVS (~ 0.75 Å/pix), αλλά η συγκεκριμένη διαφορά δε φαίνεται να αποτελεί ισχυρό εμπόδιο.

2.5.3 Εισαγωγή κατάλληλης αστρικής βιβλιοθήκης στον κώδικα PÉGASE

Τροποποίηση του κώδικα PÉGASE.2

Ο χειρισμός της αστρικής συνθετικής βιβλιοθήκης των Munari et al. (2005) και οι σχετικές τροποποιήσεις του κώδικα PÉGASE.2 είναι σε εξέλιξη, ώστε να καταστεί εφικτή η δημιουργία συνθετικών φασμάτων γαλαξιών υψηλής διακριτικής ικανότητας. Σε ό,τι αφορά τη θερμοκρασία, την επιφανειακή βαρύτητα και τη μεταλλικότητα, η τελική αστρική βιβλιοθήκη θα πρέπει να έχει την ίδια μορφή με την αστρική βιβλιοθήκη BaSeL. Επιπλέον, θα πρέπει να γίνει και κατάλληλη επιλογή των υπολοίπων παραμέτρων. Μία προκαταρκτική εκδοχή της συνθετικής αστρικής βιβλιοθήκης είναι ήδη διαθέσιμη και οι πρώτες δοκιμές έχουν ήδη πραγματοποιηθεί. Τα ανοιχτά ζητήματα προς επίλυση είναι τα εξής:

α) Η δημοσίως διαθέσιμη αστρική βιβλιοθήκη των Munari et al. (2005) δεν περιέχει φάσματα θερμών αστέρων ($T_{eff} > 10000K$) χαμηλής μεταλλικότητας ($[M/H] < -1.5$) με αφθονία $[a/Fe] = 0.4$. Το πρόβλημα θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- Να κατασκευαστούν εξ' αρχής τα επιθυμητά συνθετικά αστρικά φάσματα
- Να χρησιμοποιηθούν τα φάσματα θερμών αστέρων χαμηλής μεταλλικότητας με τιμή μόνο $[a/Fe] = 0$
- Να χρησιμοποιηθούν μόνο φάσματα αστέρων με $[a/Fe] = 0$
- Να χρησιμοποιηθεί το αστρικό φάσμα με $T = 10000K$ και $[a/Fe] = 0.4$ στη θέση όλων των φασμάτων θερμότερων αστέρων.

Σε κάθε περίπτωση, η ύπαρξη τόσο συνθετικών αστρικών φασμάτων με πληροφωρία για την α -enhancement όσο και φασμάτων με $[a/Fe] = 0$ προσφέρει την ευκαιρία να εξαχθούν πολύτιμα συμπεράσματα για την επίδραση του συγκεκριμένου παράγοντα στη μορφή και τα χρώματα των φασμάτων γαλαξιών.

β) Η δημοσίως διαθέσιμη αστρική βιβλιοθήκη των Munari et al. (2005) δεν περιέχει φάσματα ψυχρών αστέρων με $T_{eff} < 3500K$. Το πρόβλημα θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με τη χρήση αστρικών φασμάτων με θερμοκρασία $T_{eff} < 3500K$ από τη βιβλιοθήκη BaSeL. Τα φάσματα αυτά, όντας χαμηλότερης ανάλυσης, θα πρέπει να μετατραπούν στην επιθυμητή διασπορά των 1 Å/pix.

γ) Η νέα αστρική βιβλιοθήκη θα πρέπει να βαθμονομηθεί.

Δοκιμές με τη βιβλιοθήκη BaSeL

Εν αναμονή της νέας συνθετικής αστρικής βιβλιοθήκης υψηλής διακριτικής ικανότητας, πραγματοποιήθηκε μία σειρά από προκαταρκτικές δοκιμές με τη χρήση της υπάρχουσας συνθετικής βιβλιοθήκης αστρικών φασμάτων χαμηλής ανάλυσης BaSeL. Αν και τα φάσματα αυτά δεν είναι επαρκή ώστε να μελετηθεί με την κατάλληλη ανάλυση η περιοχή μηκών κύματος που θα καλύψει ο φασματογράφος RVS, εντούτοις μπορούν να εξαχθούν κάποια χρήσιμα αρχικά συμπεράσματα και να αναπτυχθεί το αναγκαίο λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση των φασμάτων υψηλής διακριτικής ικανότητας.

Ο συγκεκριμένος στόχος των δοκιμών προσομοίωσης ήταν να δημιουργηθούν συνθετικά φάσματα γαλαξιών με τον κώδικα PÉGASE.2 και να μελετηθεί η συμπεριφορά των φασμάτων αυτών στην περιοχή μηκών κύματος που θα καλύψει ο φασματογράφος RVS, στο βαθμό που το επιτρέπει η χαμηλή ανάλυση των φασμάτων της αστρικής βιβλιοθήκης BaSeL. Για τον σκοπό αυτό, δημιουργήθηκαν συνθετικά φάσματα γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου, σπειροειδών και ανώμαλων.

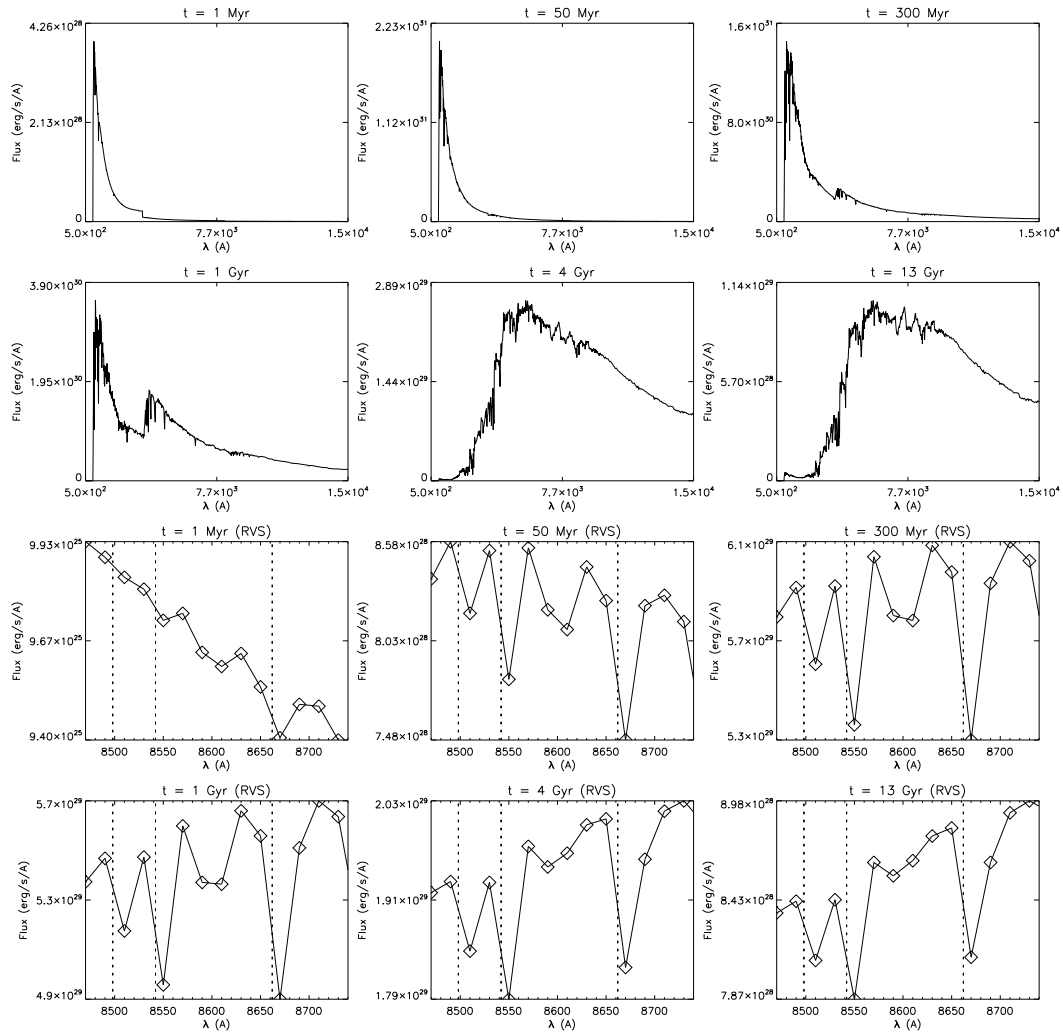
Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν τρία συνθετικά φάσματα γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου με (α) ρυθμό αστρικής δημιουργίας ανάλογο με τη μάζα του αερίου (Tsalmantza et al., 2007), (β) ρυθμό αστρικής δημιουργίας ανάλογο με τη μάζα του αερίου και αρχική συνάρτηση μάζας (IMF) Salpeter - σε αντίθεση με την εν χρήση συνάρτηση των Rana & Basu (Rana and Basu, 1992), και (γ) ρυθμό αστρικής δημιουργίας που μειώνεται εκθετικά (Tsalmantza et al., 2009). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στις εικόνες 2.57, 2.58 και 2.59, αντίστοιχα, και αφορούν τα συνεχή φάσματα. Σε αυτές παρατίθενται τα συνθετικά φάσματα του εκάστοτε γαλαξία στις ηλικίες των $t = 1 \text{ Myr}$, 50 Myr , 300 Myr , 1 Gyr , 4 Gyr και 13 Gyr , καθώς και τα τμήματα των φασμάτων που αντιστοιχούν στη φασματική περιοχή του οργάνου RVS.

Δημιουργήθηκε επίσης ένα συνθετικό φάσμα σπειροειδούς γαλαξία, το συνεχές του οποίου παρουσιάζεται στο σχήμα 2.60 στις ίδιες ηλικίες με τα συνθετικά φάσματα προγενέστερου φασματικού τύπου. Τέλος, κατασκευάστηκε ένα συνθετικό φάσμα ανώμαλου γαλαξία, το συνεχές του οποίου παρουσιάζεται

στο σχήμα 2.61. Λόγω του ότι τα τελικά συνθετικά φάσματα ανώμαλων γαλαξιών επιλέγονται να έχουν ηλικία 9 Gyr, το φάσμα του ανώμαλου γαλαξία του παραπάνω σχήματος απεικονίζεται έως την ηλικία αυτή.

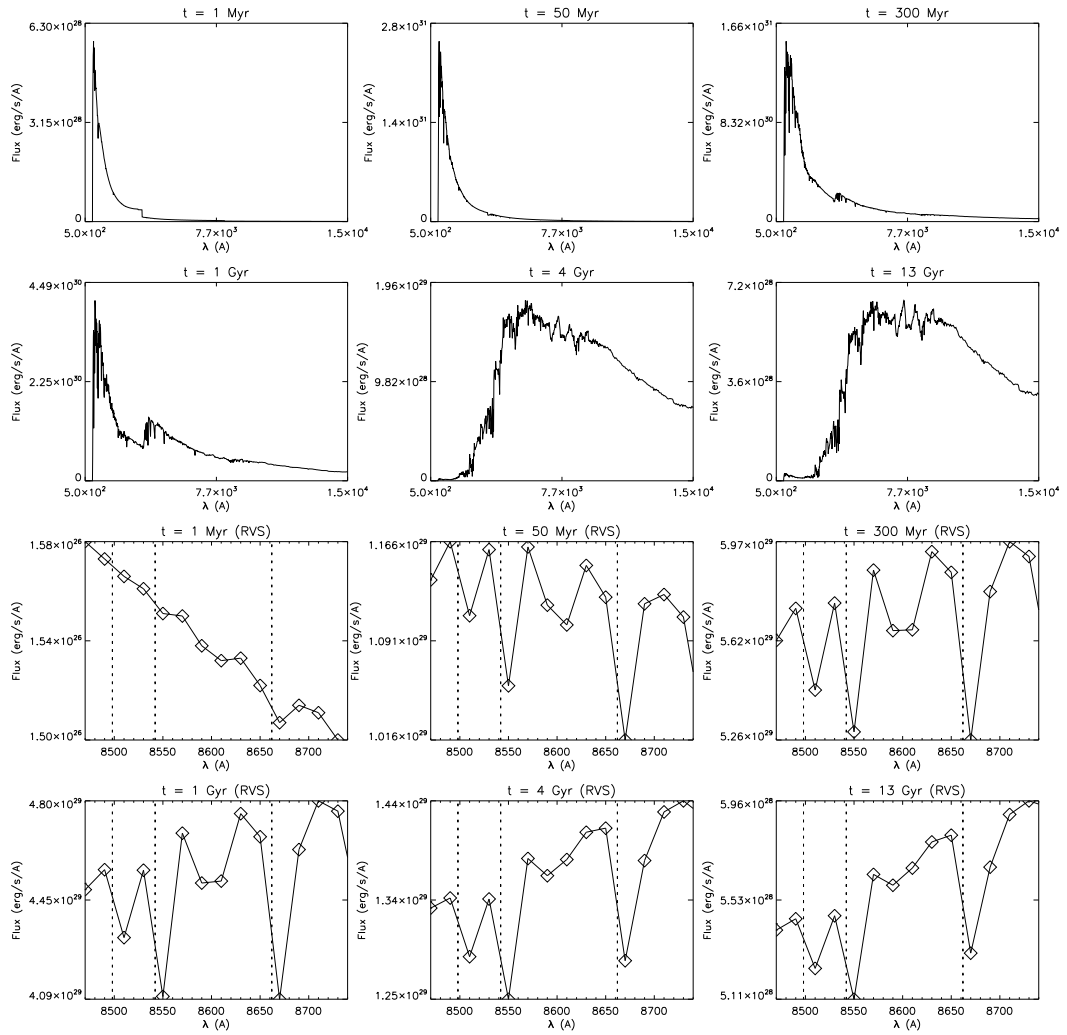
Η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά της τριπλέτας ασβεστίου είναι εξαιρετικά δύσκολη, λόγω της χαμηλής ανάλυσης της αστρικής βιβλιοθήκης που χρησιμοποιεί ο κώδικας PÉGASE. Ενδεικτικό είναι μάλιστα το γεγονός ότι στη φασματική περιοχή του φασματογράφου RVS περιέχονται μόνο 14 σημεία μηκών κύματος, έναντι των 28 σημείων που έχει στην ίδια περιοχή η αστρική βιβλιοθήκη των Munari et al. (2005). Παρόλα αυτά, φαίνεται πως υπάρχει μία διαφοροποίηση στη χρονική εξέλιξη της τριπλέτας του ασβεστίου μεταξύ των διαφορετικών φασματικών τύπων, γεγονός που θα πρέπει να οφείλεται και στη διαφορετική χρονική εξέλιξη των φασμάτων αυτών καθ' εαυτών. Παράλληλα, δε διαφαίνεται κάποια σημαντική διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων των εικόνων 2.57 και 2.58. Όλα τα παραπάνω πρόκειται να διερευνηθούν λεπτομερώς μετά την ενσωμάτωση στο μοντέλο PÉGASE της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων αστέρων υψηλής διακριτικής ικανότητας των (Munari et al., 2005), όπου και θα αρθούν οι περιορισμοί της φασματικής ανάλυσης.

Early type galaxy



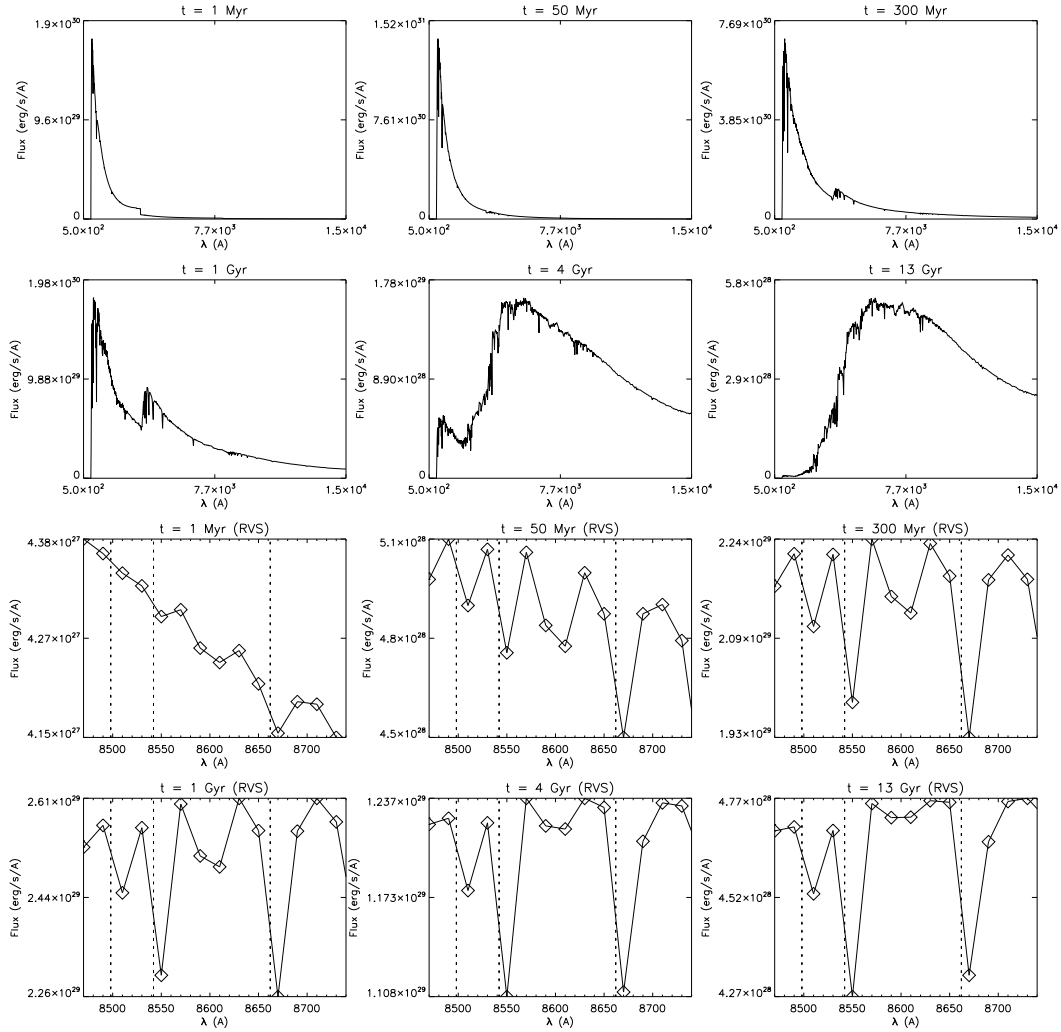
Σχήμα 2.57: Συνθετικό φάσμα γαλαξία προγενέστερου φασματικού τύπου με ρυθμό αστρικής δημιουργίας ανάλογο με τη μάζα του αερίου, σε διάφορες ηλικίες και με την προσθήκη του τμήματος του φάσματος που αντιστοιχεί στον φασματογράφο RVS.

Early type galaxy (IMF = Salpeter)



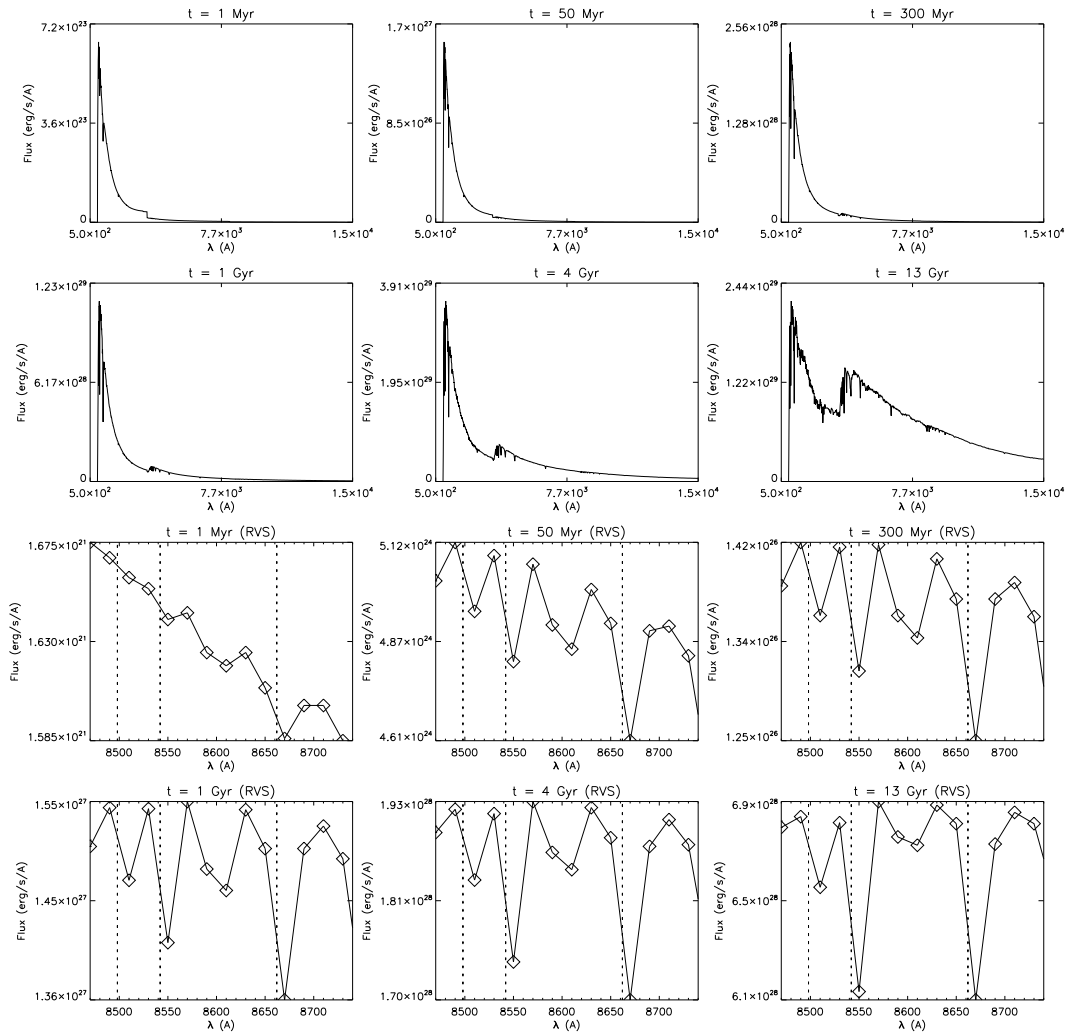
Σχήμα 2.58: Συνθετικό φάσμα γαλαξία προγενέστερου φασματικού τύπου με ρυθμό αστρικής δημιουργίας ανάλογο με τη μάζα του αερίου και αρχική συνάρτηση μάζας Salpeter, σε διάφορες ηλικίες και με την προσθήκη του τμήματος του φάσματος που αντιστοιχεί στον φασματογράφο RVS.

Early type galaxy (exponential)



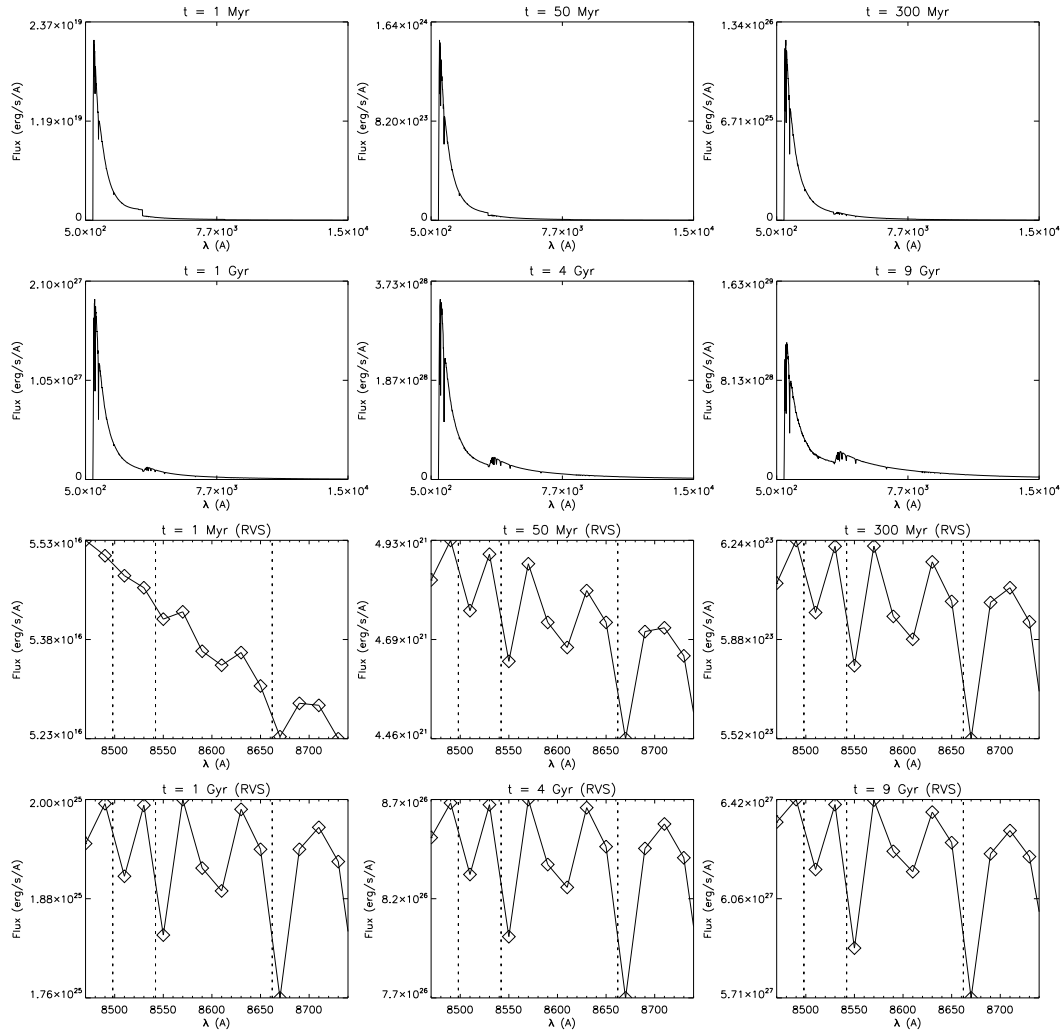
Σχήμα 2.59: Συνθετικό φάσμα γαλαξία προγενέστερου φασματικού τύπου με ρυθμό αστρικής δημιουργίας που μειώνεται εκθετικά, σε διάφορες ηλικίες και με την προσθήκη του τμήματος του φάσματος που αντιστοιχεί στον φασματογράφο RVS.

Spiral galaxy



Σχήμα 2.60: Συνθετικό φάσμα σπειροειδούς γαλαξία, σε διάφορες ηλικίες και με την προσθήκη του τμήματος του φάσματος που αντιστοιχεί στον φασματογράφο RVS.

Irregular galaxy



Σχήμα 2.61: Συνθετικό φάσμα ανώμαλου γαλαξία, σε διάφορες ηλικίες και με την προσθήκη του τμήματος του φάσματος που αντιστοιχεί στον φασματογράφο RVS.

Κεφάλαιο 3

Συμπεράσματα και μελλοντικά σχέδια

Το παρόν κεφάλαιο συνοψίζει τα αποτελέσματα και παρουσιάζει τα συμπεράσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής, καθώς και παρατηρήσεις, προτάσεις και σχέδια για μελλοντικά ερευνητικά προγράμματα.

3.1 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της διατριβής, ταξινομημένα ανά βιβλιοθήκη φασμάτων γαλαξιών, είναι τα εξής:

3.1.1 Ημιεμπειρική βιβλιοθήκη

- Τα προσομοιωμένα φάσματα γαλαξιών της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης ταξινομήθηκαν και παραμετροποιήθηκαν με τη μέθοδο τεχνητής νοημοσύνης SVM.
- Το ποσοστό των ορθών ταξινομήσεων βρέθηκε να είναι υψηλότερο για τα φάσματα με λαμπρότερο μέγεθος G και για τους γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και τους ανώμαλους.
- Οι εσφαλμένα ταξινομημένοι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου ταξινομούνται κυρίως ως σπειροειδείς και το αντίστροφο, ενώ οι εσφαλμένα ταξινομημένοι ανώμαλοι γαλαξίες και οι QSFG ταξινομούνται κυρίως ως σπειροειδείς.
- Οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και οι ανώμαλοι γαλαξίες ταξινομούνται ορθότερα σε σχέση με τα αντίστοιχα φάσματα της συνθετικής βιβλιοθήκης (Tsalmantza, Kontizas et al. 2009).
- Το σφάλμα πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης βρέθηκε να είναι μικρότερο για τα φάσματα με λαμπρότερο μέγεθος G , με $z \leq 0.2$ και για τους γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και τους σπειροειδείς.
- Η πρόβλεψη της ερυθρομετατόπισης των ορθώς ταξινομημένων φασμάτων γαλαξιών βρέθηκε να είναι ελαφρώς καλύτερη σε σχέση με τα εσφαλμένα ταξινομημένα σφάλματα γαλαξιών.

3.1.2 Βελτιστοποίηση συνθετικής βιβλιοθήκης

- Έγινε εφαρμογή της στατιστικής μεθόδου PCA και βρέθηκε ότι η βιβλιοθήκη των συνθετικών φασμάτων μπορεί να αναλυθεί αποτελεσματικά με τη χρήση μόνο των δύο κυριότερων συνιστωσών-ιδιοδιανυσμάτων PC1 και PC2, επιτρέποντας έτσι τη δραστική μείωση των διαστάσεων χωρίς σημαντική απώλεια πληροφορίας.
- Έγινε εφαρμογή της στατιστικής μεθόδου PCA σε επιμέρους δείγματα φασμάτων, με τα ιδιοδιανύσματα να παραμένουν ευσταθή.

- Έγινε εφαρμογή της στατιστικής μεθόδου PCA ανά φασματικό τύπο, με το ιδιοδιάνυσμα PC1 να είναι διαφορετικό για κάθε τύπο, και το PC2 να παραμένει πρακτικώς αμετάβλητο.
- Κατά την προβολή των φασμάτων στις δύο κυριότερες συνιστώσες διαπιστώθηκε η ύπαρξη εκτεταμένων αλληλεπικαλύψεων, με τους σπειροειδείς γαλαξίες να αλληλεπικαλύπτονται ισχυρώς με τους γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και τους QSFG, και τους τελευταίους να αλληλεπικαλύπτονται ισχυρώς με τους ανώμαλους γαλαξίες.
- Πραγματοποιήθηκε μία λεπτομερής παράλληλη ανάλυση του σεναρίου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας κάθε φασματικού τύπου και των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της μεθόδου PCA, η οποία είχε ως αποτέλεσμα να βελτιστοποιηθεί η βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων γαλαξιών (Karampelas et al., 2010, 2012) μέσω της περικοπής των φασμάτων γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου με γραμμές εκπομπής (ομοιότητα με σπειροειδείς) ή με εξαιρετικά ασθενή αρχικό ρυθμό αστρικής δημιουργίας, των σπειροειδών γαλαξιών που αντιστοιχούν σε πολύ υψηλές τιμές της παραμέτρου p_2 (ομοιότητα με ανώμαλους γαλαξίες και QSFG), των ανώμαλων γαλαξιών και των QSFG με εξαιρετικά υψηλές τιμές των παραμέτρων p_2 και t_{infall} (όμοιοι μεταξύ τους) και των QSFG χωρίς γραμμές εκπομπής (ομοιότητα με σπειροειδείς).
- Τα βέλτιστα συνθετικά φάσματα γαλαξιών καταλογοποιήθηκαν και αναρτήθηκαν στο Κέντρο Αστρονομικών Δεδομένων CDS του Στρασβούργου (Centre de Données astronomiques de Strasbourg).
- Στη βελτιστοποιημένη βιβλιοθήκη, οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου δεν αλληλεπικαλύπτονται πλέον με τους σπειροειδείς γαλαξίες στο επίπεδο των ιδιοδιανυσμάτων PC1 - PC2, ενώ έχουν περιοριστεί αισθητά οι αλληλεπικαλύψεις μεταξύ σπειροειδών και ανωμάτων γαλαξιών και μεταξύ σπειροειδών και QSFG, καθώς και η υψηλή συγκέντρωση όμοιων μεταξύ τους φασμάτων μεταγενέστερου φασματικού τύπου.
- Η βελτιστοποίηση της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών είχε ως αποτέλεσμα τον περιορισμό των αλληλεπικαλύψεων στο διάγραμμα των δύο χρωμάτων $(g - r) - (r - i)$, με την κάλυψη των παρατηρήσεων από το SDSS να έχει διατηρηθεί.
- Τα προσομοιωμένα φάσματα γαλαξιών τόσο της αρχικής συνθετικής βιβλιοθήκης (Tsalmantza, Kontizas et al. 2009) όσο και της βέλτιστης συνθετικής βιβλιοθήκης (Karampelas et al., 2012) ταξινομήθηκαν και παραμετροποιήθηκαν με τη στατιστική μέθοδο SVM.

- Η απόδοση του UGC στην ταξινόμηση των προσομοιωμένων φασμάτων χωρίς θόρυβο, απορρόφηση ή ερυθρομετατόπιση ανήλθε σχεδόν στο 100%.
- Στην περίπτωση των προσομοιωμένων φασμάτων με θόρυβο, απορρόφηση και ερυθρομετατόπιση, οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου ταξινομήθηκαν πολύ καλύτερα σε σχέση με τα αρχικά φάσματα, οι σπειροειδείς και οι ανώμαλοι ελαφρώς καλύτερα, ενώ οι QSGF σχεδόν το ίδιο.
- Η παραμετροποίηση υπήρξε σε γενικές γραμμές περισσότερο επιτυχημένη στα βέλτιστα φάσματα σε σχέση με τα αρχικά, με την αξιολόγηση όμως των τιμών των σφαλμάτων να μην είναι προφανής, λόγω κυρίως του γεγονότος ότι η μεταβολή των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας κατά την κατασκευή των συνθετικών φασμάτων δεν επιδρά γραμμικά στη μορφή των φασμάτων αυτών.
- Η βελτιστοποίηση της βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών μέσω της διερεύνησης του ιστορικού αστρικής δημιουργίας των διαφόρων φασματικών τύπων και της εφαρμογής της στατιστικής μεθόδου PCA (Karampelas et al., 2012) οδήγησε στην καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το μοντέλο PÉGASE κατασκευάζει συνθετικά φάσματα, καθώς και των δυνατοτήτων των στατιστικών μεθόδων ανάλυσης και επεξεργασίας μεγάλων βάσεων δεδομένων.

3.1.3 Νέα συνθετική βιβλιοθήκη

- Δημιουργήθηκε μία νέα βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων γαλαξιών με τη χρήση του κώδικα PÉGASE.2.
- Τα νέα συνθετικά φάσματα κατασκευάστηκαν στην ηλικία που αντιστοιχεί στην ερυθρομετατόπισή τους.
- Τα νέα συνθετικά φάσματα αντιστοιχούν σε εύρη παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας που είναι συνεπή με τη διαδικασία βελτιστοποίησης των συνθετικών φασμάτων.
- Οι σπειροειδείς γαλαξίες, οι ανώμαλοι και οι QSGF έχουν κατασκευαστεί για διάφορες τιμές κλίσης (inclination) του δίσκου τους, δηλαδή για διαβαθμίσεις εσωτερικής απορρόφησης.
- Δημιουργήθηκαν συνθετικά φάσματα που αντιστοιχούν στους λαμπρούς κόκκινους γαλαξίες LRG.

3.1.4 Φάσματα με επεισοδιακή αστρογέννεση

- Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση σεναρίων επεισοδιακής αστρογέννεσης και ορίστηκαν οι κατάλληλες παράμετροι που ελέγχουν το ρυθμό αστρικής δημιουργίας (αριθμός, χρονική στιγμή έναρξης, διάρκεια και ένταση κάθε έξαρσης αστρικής δημιουργίας) και οι οριακές τους τιμές.
- Δημιουργήθηκαν τα πρώτα συνθετικά φάσματα γαλαξιών με επεισοδιακή αστρογέννεση με τη χρήση του κώδικα PÉGASE.2.

3.1.5 Συνθετική βιβλιοθήκη υψηλής διακριτικής ικανότητας

- Διερευνήθηκαν οι διαθέσιμες βιβλιοθήκες αστρικών φασμάτων υψηλής διακριτικής ικανότητας για την ενσωμάτωσή τους στον κώδικα PÉGASE.2, όπου και επελέγη η βιβλιοθήκη των Munari et al. (2005).
- Πραγματοποιήθηκε μία σειρά από προκαταρκτικές δοκιμές με τη χρήση της υπάρχουσας συνθετικής βιβλιοθήκης αστρικών φασμάτων χαμηλής διακριτικής ικανότητας BaSeL, όπου δημιουργήθηκαν συνθετικά φάσματα γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου, σπειροειδών και ανωμάτων, και μελετήθηκε ιδιαίτερα η τριπλέτα του ασβεστίου.

3.2 Μελλοντικά σχέδια

Η τελική βάση δεδομένων της διαστημικής αποστολής Gaia θα περιέχει περισσότερα από ένα δισεκατομμύριο αστροφυσικά αντικείμενα, από μικρούς αστεροειδείς του Ηλιακού μας συστήματος έως μακρινούς γαλαξίες και κβάζαρες. Σε ότι αφορά τους γαλαξίες, τα εκατομμύρια φάσματά τους θα έχουν ταξινομηθεί και παραμετροποιηθεί από το σύστημα UGC, με βάση κυρίως τη βελτιστοποιημένη βιβλιοθήκη και τη νέα βιβλιοθήκη συνθετικών φασμάτων γαλαξιών, όπως περιγράφεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Οι μελλοντικές ενέργειες που θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν σχετικά με τον τεράστιο αυτό όγκο πληροφοριών που θα προσφέρει η Gaia σχετικά με τους γαλαξίες είναι πολλές, μερικές από τις οποίες αναφέρονται παρακάτω:

1. Αξιολόγηση και διερεύνηση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης και της παραμετροποίησης των γαλαξιών από το UGC.
2. Αναζήτηση γαλαξιών με ιδιαίτερα/νέα χαρακτηριστικά.
3. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων για εξαγωγή των σημαντικότερων πληροφοριών από την τεράστια βάση δεδομένων του δορυφόρου Gaia, συμπεριλαμβανομένων και άλλων στατιστικών μεθόδων ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων.
4. Σύγκριση αποτελεσμάτων με αντίστοιχα αποτελέσματα από παρόμοια ερευνητικά προγράμματα παρατήρησης μεγάλου βεληνικού, όπως το SDSS.
5. Υπολογισμός των μαζών και των ιστορικών αστρικής δημιουργίας των παρατηρηθέντων γαλαξιών.
6. Διερεύνηση του συσχετισμού μάζας - μεταλλικότητας.
7. Υπολογισμός της συνάρτησης λαμπρότητας των παρατηρηθέντων γαλαξιών.
8. Αναζήτηση συσχετισμών μεταξύ της έντασης αστρογέννησης των γαλαξιών και του περιβάλλοντός τους.
9. Διερεύνηση συσταδοποίησης των παρατηρηθέντων γαλαξιών.
10. Εκτίμηση του τρόπου με τον οποίο το λογισμικό του συστήματος UGC θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικές φασματοφωτομετρικές επίγειες και διαστημικές παρατηρήσεις, οι οποίες δεν θα είναι κατ' ανάγκη σχετικές με γαλαξίες.

Πέραν όμως της υποστήριξης του συστήματος UGC, στην παρούσα διδακτορική διατριβή έλαβε χώρα μία εκτενής διερεύνηση του μοντέλου φασματικής εξέλιξης γαλαξιών PÉGASE, και ειδικότερα του τρόπου με τον οποίο η επιλογή των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας επηρεάζει τη μορφή του τελικού φάσματος, καθώς και του πώς αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βελτιστοποίηση βιβλιοθηκών φασμάτων γαλαξιών. Οι μελλοντικές ενέργειες που θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν σχετικά με τον βέλτιστο τρόπο χρήσης του μοντέλου PÉGASE για τη δημιουργία ρεαλιστικότερων φασμάτων είναι επίσης πολλές, μερικές από τις οποίες αναφέρονται παρακάτω:

1. Χρήση των αποτελεσμάτων της στατιστικής μεθόδου PCA για τη δημιουργία συνθετικών φασμάτων με επιθυμητά χαρακτηριστικά και τη διερεύνηση και αξιολόγηση προσομοιωμένων φασμάτων.
2. Περαιτέρω διερεύνηση και επέκταση του σεναρίου αστρικής δημιουργίας των γαλαξιών QSFG, ώστε να συμπεριληφθεί και η περίπτωση παύσης της αστρικής δημιουργίας σε πρότερο χρόνο (γαλαξίες μεγάλης ερυθρομετατόπισης).
3. Δημιουργία συνθετικών φασμάτων ανώμαλων γαλαξιών μόνο για τιμές ερυθρομετατόπισης στις οποίες μπορούν πρακτικά να παρατηρηθούν.
4. Επιλογή των καταλληλότερων τιμών των παραμέτρων σεναρίου αστρικής δημιουργίας στην περίπτωση των λαμπρών κόκκινων γαλαξιών, δεδομένης της λαμπρότητάς τους.
5. Δημιουργία συνθετικών φασμάτων γαλαξιών που αντιστοιχούν σε σενάρια αστρικής δημιουργίας με επεισόδια αστρογέννεσης και σύγκριση με παρατηρηθέντα φάσματα νάνων γαλαξιών του Τοπικού σμήνους.
6. Διερεύνηση των περιπτώσεων κατά τις οποίες οι τιμές των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας είναι τέτοιες, ώστε προσωρινά ζητείται από το μοντέλο PÉGASE να προσομοιώσει την κατανάλωση περισσότερου αερίου από όσο διατίθεται για αστρογέννεση.
7. Δημιουργία βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών υψηλής διακριτικής ικανότητας για τον φασματογράφο RVS με τη χρήση των παραμέτρων των προηγούμενων συνθετικών βιβλιοθηκών για τα φωτόμετρα BP/RP.
8. Αξιολόγηση των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών υψηλής διακριτικής ικανότητας για τον φασματογράφο RVS μέσω της σύγκρισης με πραγματικά φάσματα γαλαξιών παρόμοιων χαρακτηριστικών.

9. Ενδελεχής μελέτη των φασματικών δεικτών που σχετίζονται με την τριπλέτα ασβεστίου, στην περίπτωση των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών υψηλής διακριτικής ικανότητας.
10. Συνυπολογισμός του μεγέθους u των φασμάτων του SDSS και των συνθετικών φασμάτων ώστε να είναι περισσότερο λεπτομερής η μεταξύ τους σύγκριση, καθώς πλέον θα γίνεται στο τρισδιάστατο επίπεδο χρωμάτων $(u-g)-(g-r)-(r-i)$.

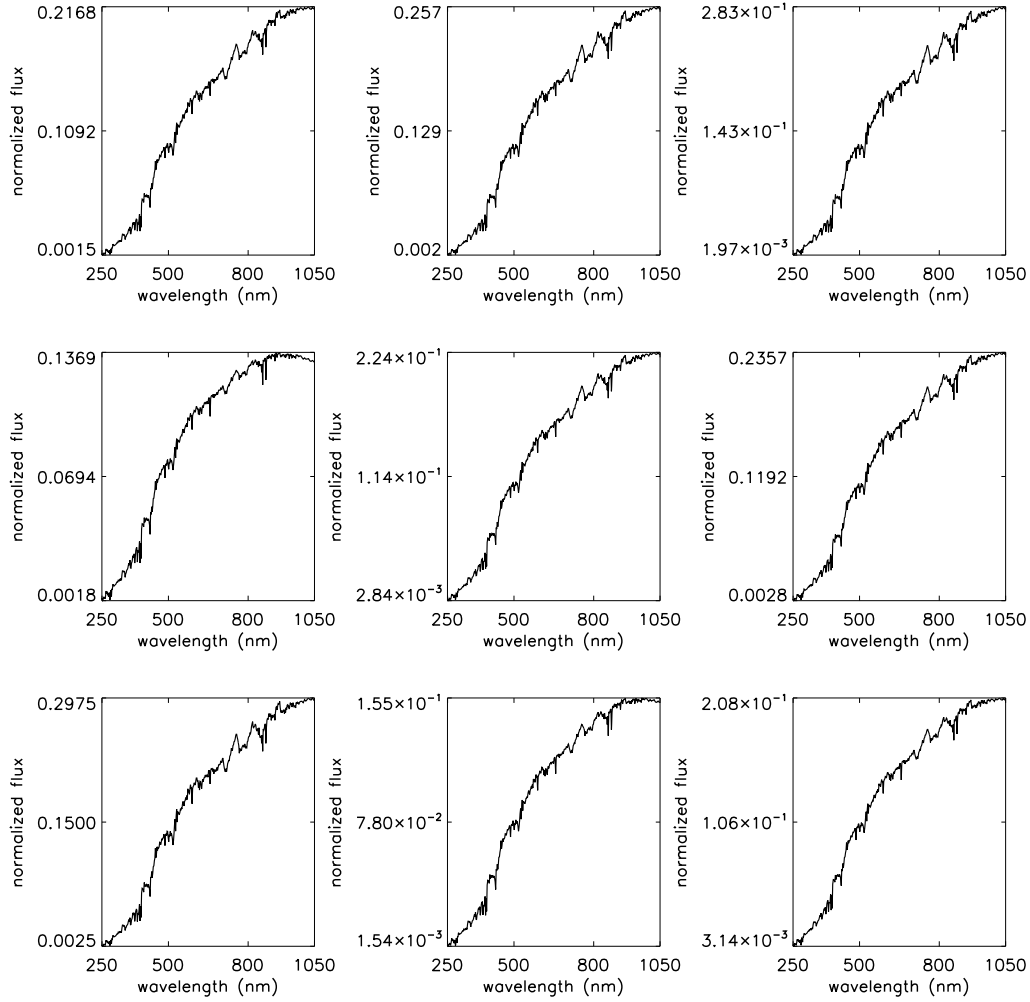
Κεφάλαιο 4

Παραρτήματα, βιβλιογραφία και κατάλογοι

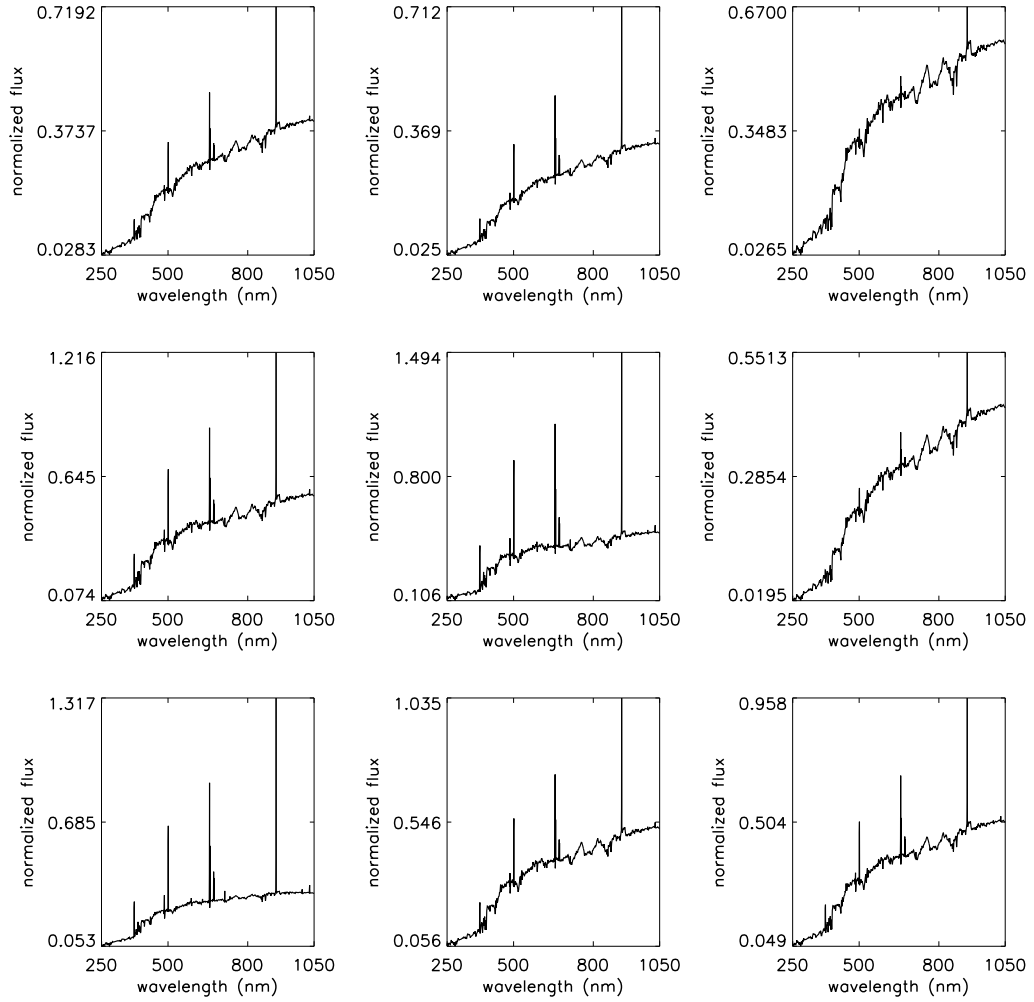
Στο παρόν κεφάλαιο περιέχονται επιπλέον πληροφορίες και διαγράμματα που αφορούν στα βέλτιστα συνθετικά φάσματα γαλαξιών, στις κύριες συνιστώσες που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου PCA σε αυτά και στις προβολές των φασμάτων στις προαναφερθείσες κύριες συνιστώσες (Παραρτήματα Α, Β και Γ), η βιβλιογραφία και οι κατάλογοι σχημάτων και πινάκων.

Παράρτημα Α: Δείγμα βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών

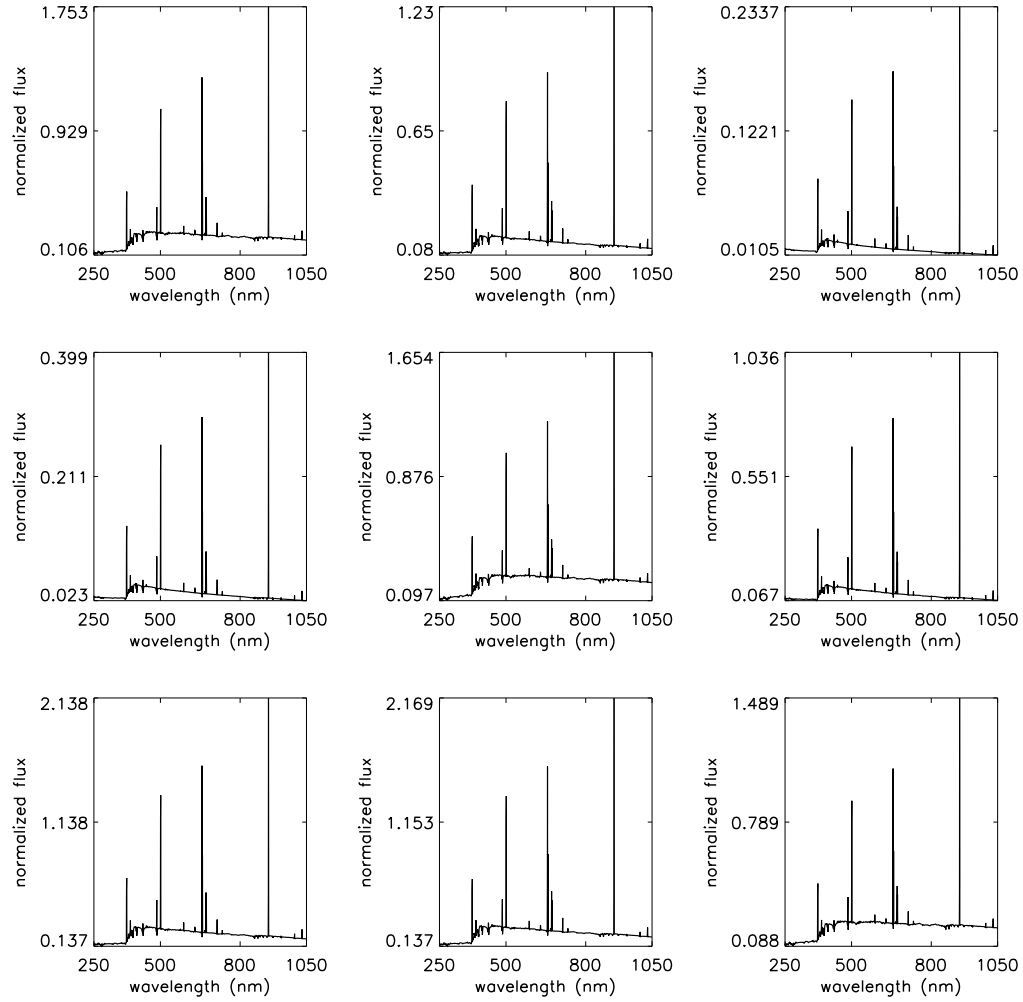
Σε κάθε μία από τις εικόνες 4.1, 4.2, 4.3 και 4.4 παρουσιάζεται ένα δείγμα βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών, επιλεγμένων με τυχαίο τρόπο, τα οποία αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο ανά περίπτωση φασματικό τύπο.



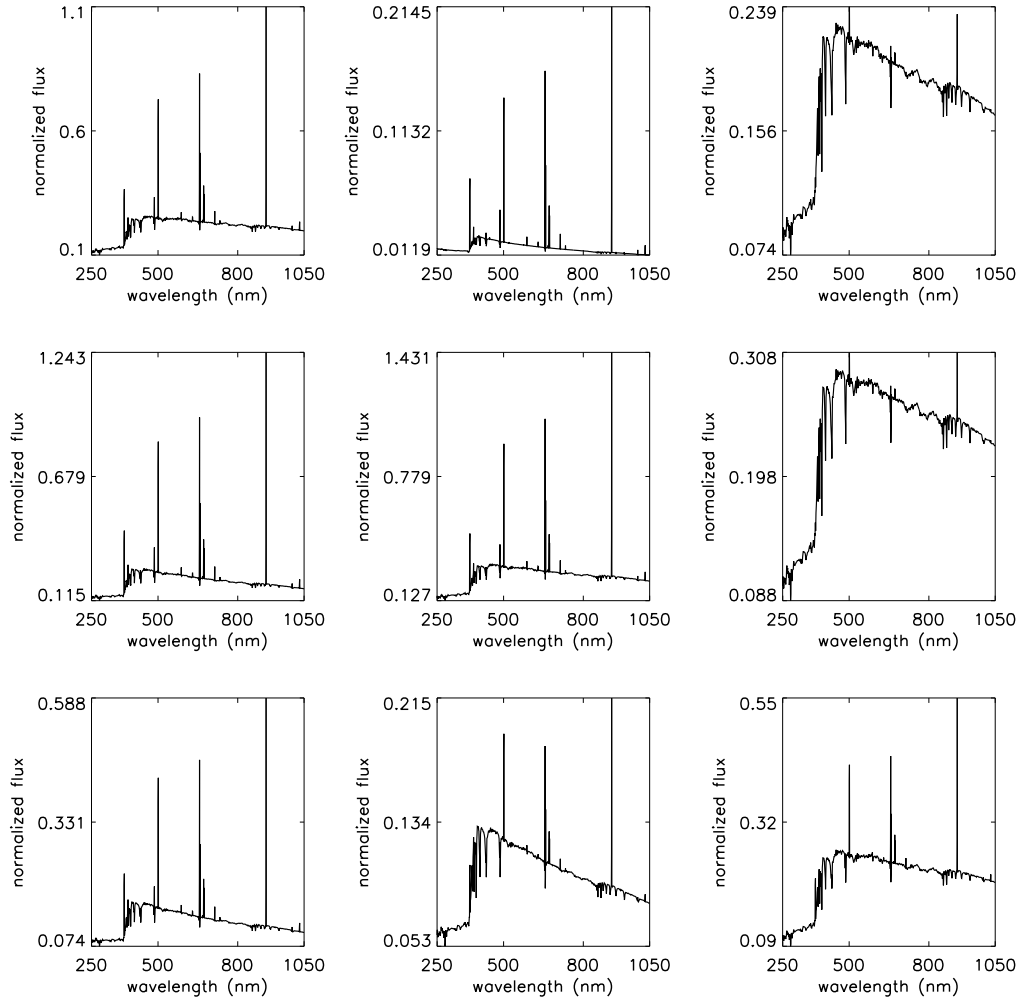
Σχήμα 4.1: Δείγμα βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου, επιλεγμένων με τυχαίο τρόπο.



Σχήμα 4.2: Δείγμα βέλτιστων συνθετικών φασμάτων σπειροειδών γαλαξιών, επιλεγμένων με τυχαίο τρόπο.



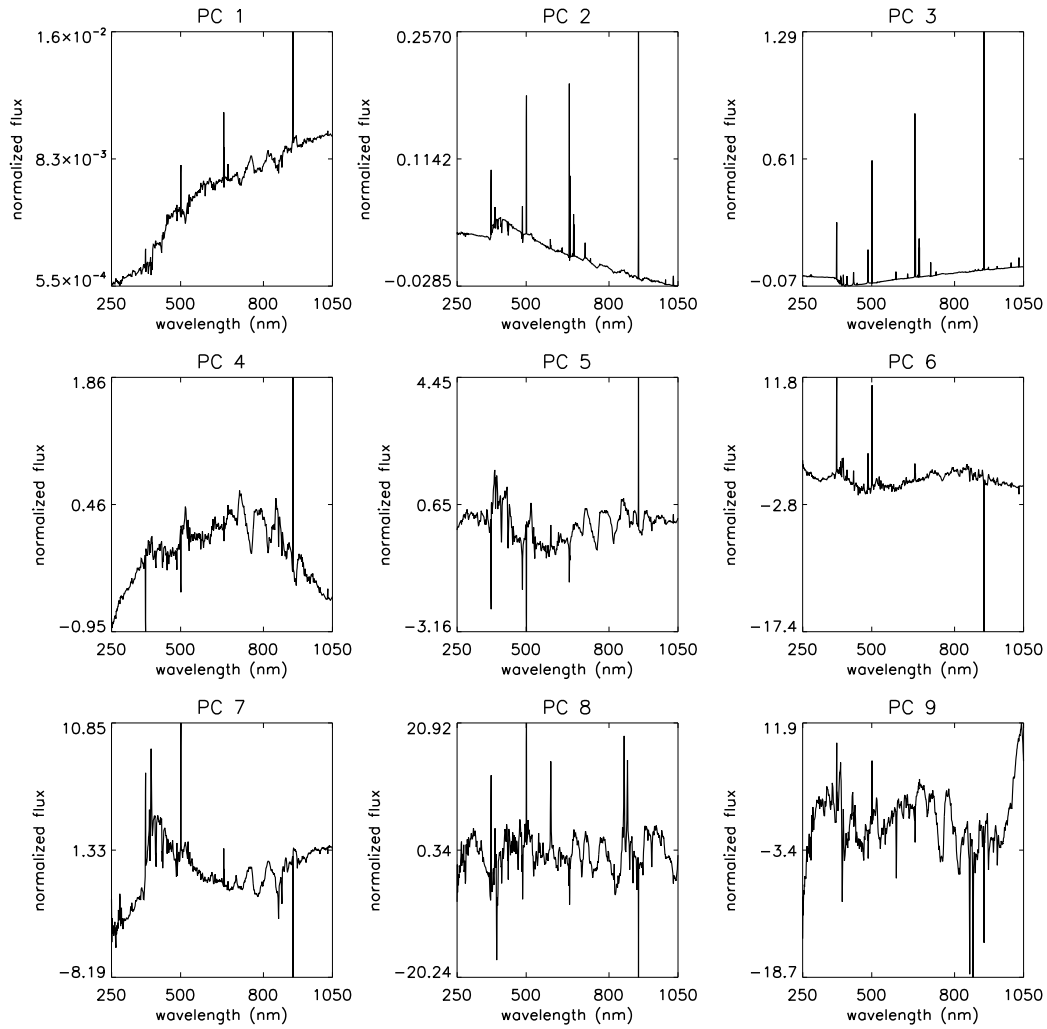
Σχήμα 4.3: Δείγμα βέλτιστων συνθετικών φασμάτων ανώμαλων γαλαξιών, επιλεγμένων με τυχαίο τρόπο.



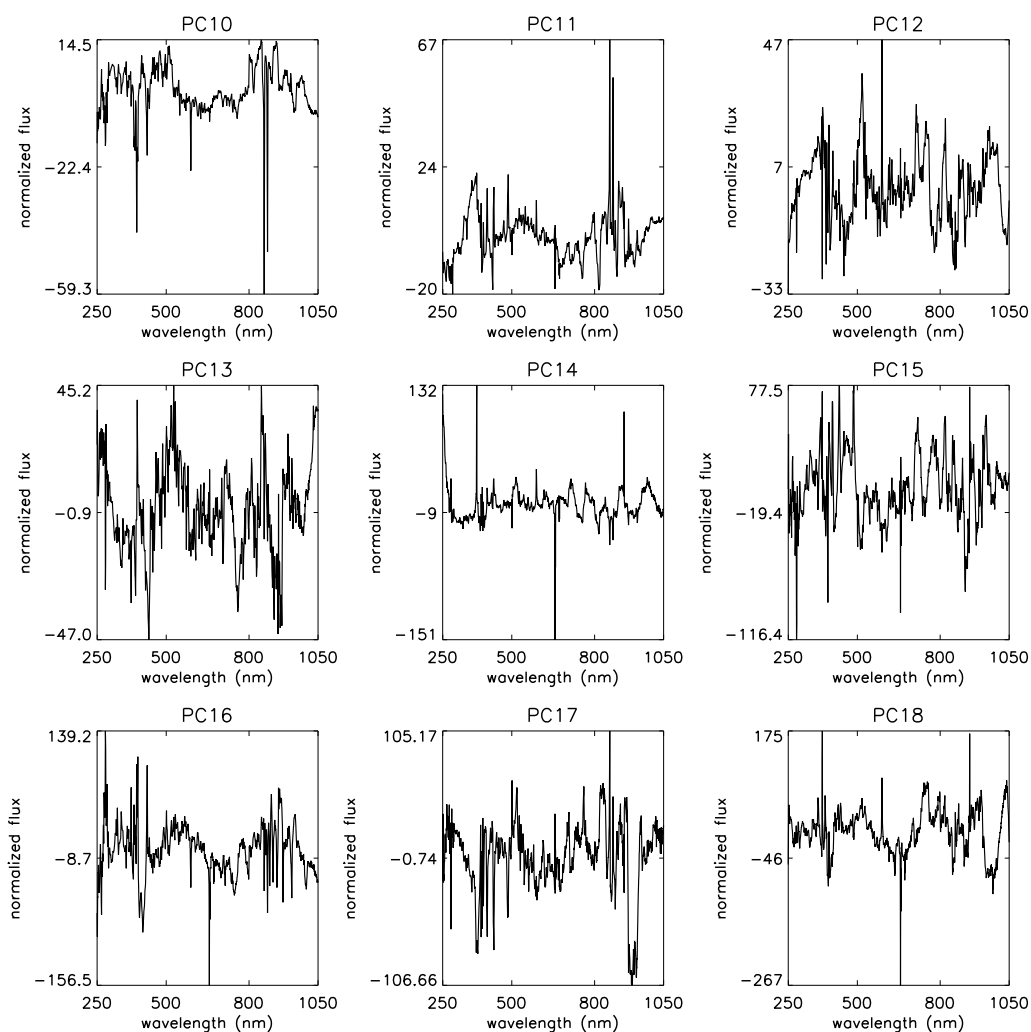
Σχήμα 4.4: Δείγμα βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών QSFG, επιλεγμένων με τυχαίο τρόπο.

Παράρτημα Β: Κύριες συνιστώσες των βέλτιστων φασμάτων

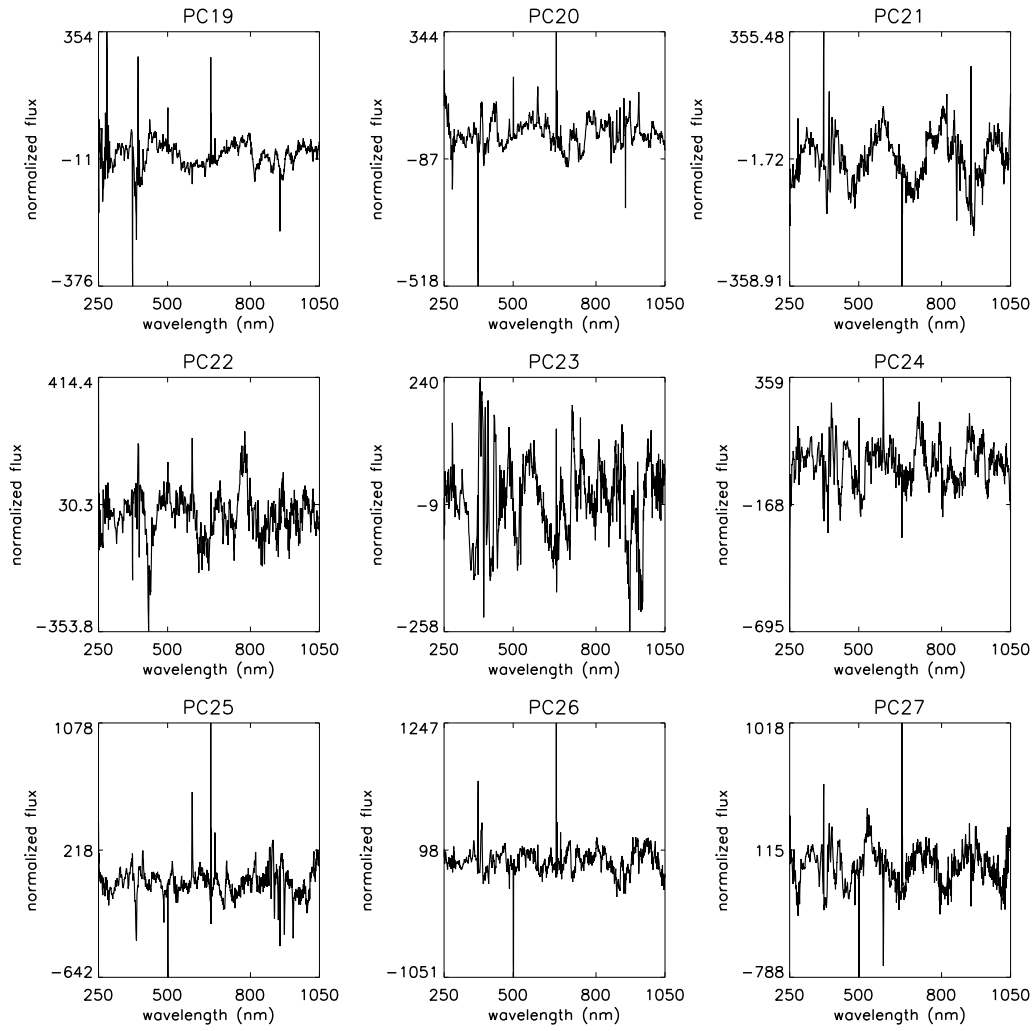
Στις εικόνες 4.5, 4.6 και 4.7 παρουσιάζονται οι 27 κυριότερες συνιστώσες (PC1 - PC27) των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. Οι συνιστώσες αυτές προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο PCA. Η εποπτική μελέτη τους επιβεβαιώνει το στατιστικό συμπέρασμα ότι οι λιγότερο σημαντικές συνιστώσες αποτελούν ένα είδος «θορύβου» των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών.



Σχήμα 4.5: Συνιστώσες $PC1 - PC9$ των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών.



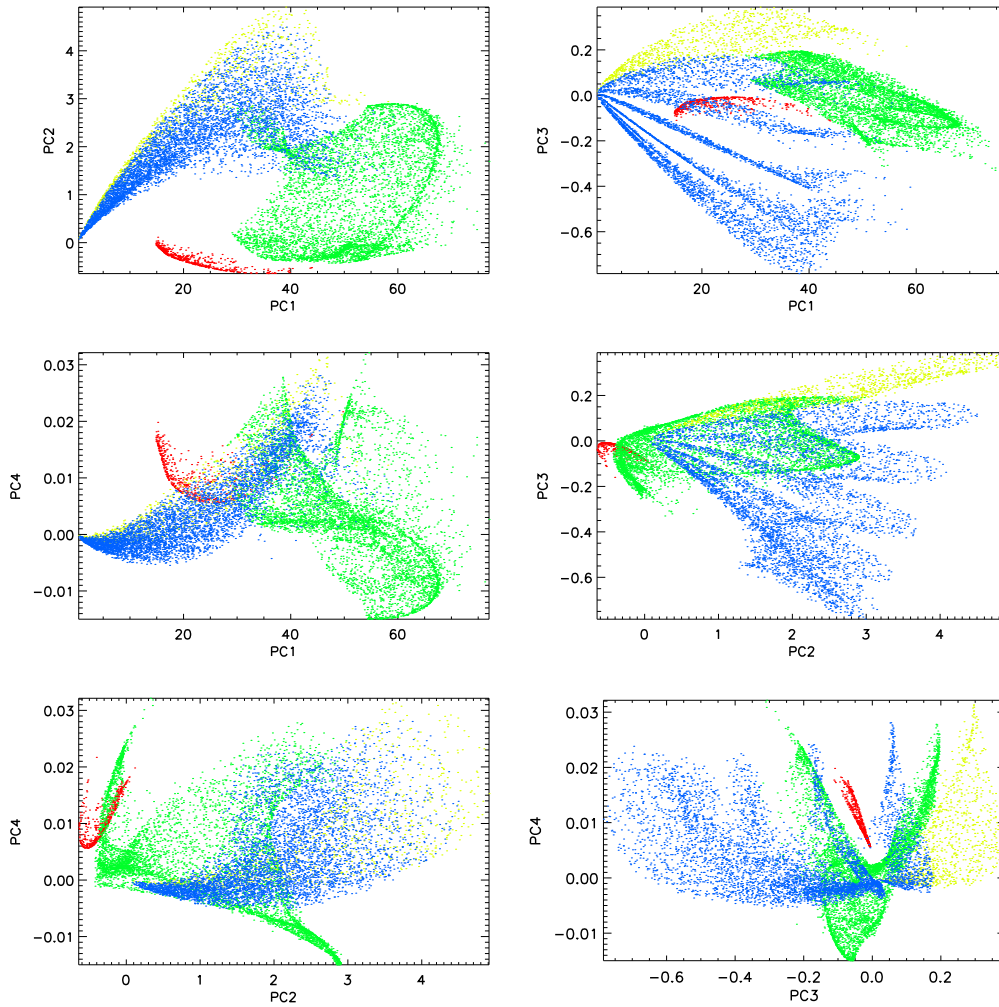
Σχήμα 4.6: Συνιστώσες $PC10 - PC18$ των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών.



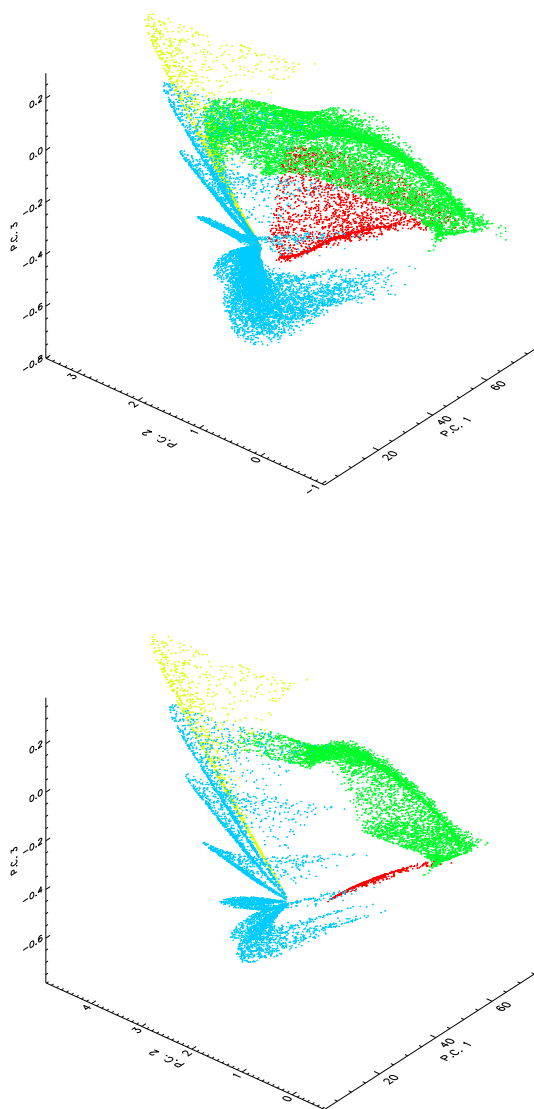
Σχήμα 4.7: Συνιστώσες $PC19 - PC27$ των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών.

Παράρτημα Γ: Προβολές των βέλτιστων φασμάτων στις κύριες συνιστώσες

Στο σχήμα 4.8 προβάλλονται τα βέλτιστα συνθετικά φάσματα γαλαξιών για όλους τους ανά δύο δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ των συνιστωσών PC1 - PC4 και για όλους τους φασματικούς τύπους ταυτόχρονα. Το σχήμα 4.9 παρουσιάζει την τρισδιάστατη αντίστοιχη προβολή στις συνιστώσες PC1, PC2 και PC3, τόσο πριν, όσο και μετά την πραγματοποιηθείσα βελτιστοποίηση.



Σχήμα 4.8: Προβολή των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών για όλους τους ανά δύο συνδυασμούς των συνιστωσών PC1 έως PC4. Οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου, οι σπειροειδείς γαλαξίες, οι ανώμαλοι γαλαξίες και οι γαλαξίες QSGF συμβολίζονται με κόκκινα, πράσινα, κίτρινα και μπλε σημεία, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.9: Προβολή των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στις συνιστώσες PC1, PC2 και PC3 πριν (πάνω) και μετά (κάτω) τη βελτιστοποίηση. Οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου, οι σπειροειδείς γαλαξίες, οι ανώμαλοι γαλαξίες και οι γαλαξίες QSGF συμβολίζονται με κόκκινα, πράσινα, κίτρινα και μπλε σημεία, αντίστοιχα.

Βιβλιογραφία

J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, S. S. Allam, K. S. J. Anderson, S. F. Anderson, J. Annis, N. A. Bahcall, C. A. L. Bailer-Jones, I. K. Baldry, J. C. Barentine, T. C. Beers, V. Belokurov, A. Berlind, M. Bernardi, M. R. Blanton, J. J. Bochanski, W. N. Boroski, D. M. Bramich, H. J. Brewington, J. Brinchmann, J. Brinkmann, R. J. Brunner, T. Budavári, L. N. Carey, S. Carliles, M. A. Carr, F. J. Castander, A. J. Connolly, R. J. Cool, C. E. Cunha, I. Csabai, J. J. Dalcanton, M. Doi, D. J. Eisenstein, M. L. Evans, N. W. Evans, X. Fan, D. P. Finkbeiner, S. D. Friedman, J. A. Frieman, M. Fukugita, B. Gillespie, G. Gilmore, K. Glazebrook, J. Gray, E. K. Grebel, J. E. Gunn, E. de Haas, P. B. Hall, M. Harvanek, S. L. Hawley, J. Hayes, T. M. Heckman, J. S. Hendry, G. S. Hennessy, R. B. Hindsley, C. M. Hirata, C. J. Hogan, D. W. Hogg, J. A. Holtzman, S.-i. Ichikawa, T. Ichikawa, Ž. Ivezić, S. Jester, D. E. Johnston, A. M. Jorgensen, M. Jurić, G. Kauffmann, S. M. Kent, S. J. Kleinman, G. R. Knapp, A. Y. Kniazev, R. G. Kron, J. Krzesinski, N. Kuropatkin, D. Q. Lamb, H. Lampeitl, B. C. Lee, R. F. Leger, M. Lima, H. Lin, D. C. Long, J. Loveday, R. H. Lupton, R. Mandelbaum, B. Margon, D. Martínez-Delgado, T. Matsubara, P. M. McGehee, T. A. McKay, A. Meiksin, J. A. Munn, R. Nakajima, T. Nash, E. H. Neilsen, Jr., H. J. Newberg, R. C. Nichol, M. Nieto-Santisteban, A. Nitta, H. Oyaizu, S. Okamura, J. P. Ostriker, N. Padmanabhan, C. Park, J. Peoples, Jr., J. R. Pier, A. C. Pope, D. Pourbaix, T. R. Quinn, M. J. Raddick, P. Re Fiorentin, G. T. Richards, M. W. Richmond, H.-W. Rix, C. M. Rockosi, D. J. Schlegel, D. P. Schneider, R. Scranton, U. Seljak, E. Sheldon, K. Shimasaku, N. M. Silvestri, J. A. Smith, V. Smolčić, S. A. Snedden, A. Stebbins, C. Stoughton, M. A. Strauss, M. SubbaRao, Y. Suto, A. S. Szalay, I. Szapudi, P. Szkody, M. Tegmark, A. R. Thakar, C. A. Tremonti, D. L. Tucker, A. Uomoto, D. E. Vanden Berk, J. Vandenberg, S. Vidrih, M. S. Vogeley, W. Voges, N. P. Vogt, D. H. Weinberg, A. A. West, S. D. M. White, B. Wilhite, B. Yanny, D. R. Yocum, D. G. York, I. Zehavi, S. Zibetti, and D. B. Zucker. The Fifth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *ApJS*,

- 172:634–644, October 2007. doi: 10.1086/518864.
- C. A. L. Bailer-Jones, M. Irwin, and T. von Hippel. Automated classification of stellar spectra - II. Two-dimensional classification with neural networks and principal components analysis. *MNRAS*, 298:361–377, August 1998. doi: 10.1046/j.1365-8711.1998.01596.x.
- I. Bellas-Velidis, M. Kontizas, E. Livanou, and P. Tsalmantza. Unresolved Galaxy Classifier for ESA’s Gaia Mission. In K. Tsinganos, D. Hatzidimitriou, and T. Matsakos, editors, *9th International Conference of the Hellenic Astronomical Society*, volume 424 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 256, July 2010.
- I. Bellas-Velidis, M. Kontizas, A. Dapergolas, E. Livanou, E. Kontizas, and A. Karamelas. Unresolved Galaxy Classifier for ESA/Gaia mission: Support Vector Machines approach. *Bulgarian Astronomical Journal*, 18(2): 020000, 2012.
- E. Bertone. An overview of high-resolution synthetic stellar libraries. *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, 8:180, 2005.
- A. Bressan, F. Fagotto, G. Bertelli, and C. Chiosi. Evolutionary sequences of stellar models with new radiative opacities. II - $Z = 0.02$. *A&AS*, 100: 647–664, September 1993.
- G. Bruzual A. PEGASE: a UV to NIR spectral evolution model of galaxies. Commentary on: Fioc M. and Rocca-Volmerange B., 1997, *A&A*, 326, 950. *A&A*, 500:521–522, June 2009. doi: 10.1051/0004-6361/200912201.
- G. Bruzual A. and S. Charlot. Spectral evolution of stellar populations using isochrone synthesis. *ApJ*, 405:538–553, March 1993. doi: 10.1086/172385.
- A. J. Cenarro, N. Cardiel, J. Gorgas, R. F. Peletier, A. Vazdekis, and F. Prada. Empirical calibration of the near-infrared Ca ii triplet - I. The stellar library and index definition. *MNRAS*, 326:959–980, September 2001a. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04688.x.
- A. J. Cenarro, J. Gorgas, N. Cardiel, S. Pedraz, R. F. Peletier, and A. Vazdekis. Empirical calibration of the near-infrared Ca ii triplet - II. The stellar atmospheric parameters. *MNRAS*, 326:981–994, September 2001b. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04689.x.
- A. J. Cenarro, J. Gorgas, N. Cardiel, A. Vazdekis, and R. F. Peletier. Empirical calibration of the near-infrared Ca II triplet - III. Fitting functions. *MNRAS*, 329:863–876, February 2002. doi: 10.1046/j.1365-8711.2002.05029.x.

- A. J. Cenarro, P. Sánchez-Blázquez, N. Cardiel, and J. Gorgas. Early-Type Galaxies in the Coma Cluster: A New Piece in the Calcium Puzzle. *AJ*, 614:L101–L104, October 2004. doi: 10.1086/425862.
- P. Coelho, B. Barbuy, J. Meléndez, R. P. Schiavon, and B. V. Castilho. A library of high resolution synthetic stellar spectra from 300 nm to 1.8 μm with solar and α -enhanced composition. *A&A*, 443:735–746, November 2005. doi: 10.1051/0004-6361:20053511.
- D. J. Eisenstein, J. Annis, J. E. Gunn, A. S. Szalay, A. J. Connolly, R. C. Nichol, N. A. Bahcall, M. Bernardi, S. Burles, F. J. Castander, M. Fukugita, D. W. Hogg, Ž. Ivezić, G. R. Knapp, R. H. Lupton, V. Narayanan, M. Postman, D. E. Reichart, M. Richmond, D. P. Schneider, D. J. Schlegel, M. A. Strauss, M. SubbaRao, D. L. Tucker, D. Vanden Berk, M. S. Vogeley, D. H. Weinberg, and B. Yanny. Spectroscopic Target Selection for the Sloan Digital Sky Survey: The Luminous Red Galaxy Sample. *AJ*, 122:2267–2280, November 2001. doi: 10.1086/323717.
- D. J. Eisenstein, I. Zehavi, D. W. Hogg, R. Scoccimarro, M. R. Blanton, R. C. Nichol, R. Scranton, H.-J. Seo, M. Tegmark, Z. Zheng, S. F. Anderson, J. Annis, N. Bahcall, J. Brinkmann, S. Burles, F. J. Castander, A. Connolly, I. Csabai, M. Doi, M. Fukugita, J. A. Frieman, K. Glazebrook, J. E. Gunn, J. S. Hendry, G. Hennessy, Z. Ivezić, S. Kent, G. R. Knapp, H. Lin, Y.-S. Loh, R. H. Lupton, B. Margon, T. A. McKay, A. Meiksin, J. A. Munn, A. Pope, M. W. Richmond, D. Schlegel, D. P. Schneider, K. Shimasaku, C. Stoughton, M. A. Strauss, M. SubbaRao, A. S. Szalay, I. Szapudi, D. L. Tucker, B. Yanny, and D. G. York. Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies. *ApJ*, 633:560–574, November 2005. doi: 10.1086/466512.
- M. Fioc and B. Rocca-Volmerange. PEGASE: a UV to NIR spectral evolution model of galaxies. Application to the calibration of bright galaxy counts. *A&A*, 326:950–962, October 1997.
- M. Fioc and B. Rocca-Volmerange. A statistical study of nearby galaxies. I. NIR growth curves and optical-to-NIR colors as a function of type, luminosity and inclination. *A&A*, 351:869–882, November 1999.
- E. L. Fitzpatrick. Correcting for the Effects of Interstellar Extinction. *PASP*, 111:63–75, January 1999. doi: 10.1086/316293.
- S. Folkes, S. Ronen, I. Price, O. Lahav, M. Colless, S. Maddox, K. Deeley, K. Glazebrook, J. Bland-Hawthorn, R. Cannon, S. Cole, C. Collins,

- W. Couch, S. P. Driver, G. Dalton, G. Efstathiou, R. S. Ellis, C. S. Frenk, N. Kaiser, I. Lewis, S. Lumsden, J. Peacock, B. A. Peterson, W. Sutherland, and K. Taylor. The 2dF Galaxy Redshift Survey: spectral types and luminosity functions. *MNRAS*, 308:459–472, September 1999. doi: 10.1046/j.1365-8711.1999.02721.x.
- A. Garcia-Rissmann, L. R. Vega, N. V. Asari, R. Cid Fernandes, H. Schmitt, R. M. González Delgado, and T. Storchi-Bergmann. An atlas of calcium triplet spectra of active galaxies. *MNRAS*, 359:765–780, May 2005. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.08957.x.
- M. D. Gladders and H. K. C. Yee. A New Method For Galaxy Cluster Detection. I. The Algorithm. *AJ*, 120:2148–2162, October 2000. doi: 10.1086/301557.
- A. N. Gorban and A. Y. Zinovyev. PCA and K-Means decipher genome. *eprint arXiv:q-bio/0504013*, April 2005.
- M. A. T. Groenewegen and T. de Jong. Synthetic AGB evolution. I - A new model. *A&A*, 267:410–432, January 1993.
- T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman. *The Elements of Statistical Learning*. Springer New York Inc., New York, USA, 2001.
- M. H. Heyer and F. P. Schloerb. Application of Principal Component Analysis to Large-Scale Spectral Line Imaging Studies of the Interstellar Medium. *ApJ*, 475:173, January 1997. doi: 10.1086/303514.
- M. Huertas-Company, D. Rouan, L. Tasca, G. Soucail, and O. Le Fèvre. A robust morphological classification of high-redshift galaxies using support vector machines on seeing limited images. I. Method description. *A&A*, 478:971–980, February 2008. doi: 10.1051/0004-6361:20078625.
- A. J. Izenman. *Modern Multivariate Statistical Techniques: Regression, Classification, and Manifold Learning*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1 edition, 2008.
- C. Jordi, E. Høg, A. G. A. Brown, L. Lindegren, C. A. L. Bailer-Jones, J. M. Carrasco, J. Knude, V. Straizys, J. H. J. de Bruijne, J.-F. Claeskens, R. Drimmel, F. Figueras, M. Grenon, I. Kolka, M. A. C. Perryman, G. Tautvaišienė, V. Vansevičius, P. G. Willemsen, A. Bridžius, D. W. Evans, C. Fabricius, M. Fiorucci, U. Heiter, T. A. Kaempfer, A. Kazlauskas, A. Kučinskas, V. Mal'YUTO, U. Munari, C. Reylé, J. Torra, A. Vallenari, K. Zdanavičius, R. Korakitis, O. Malkov, and A. Smette. The design

- and performance of the Gaia photometric system. *MNRAS*, 367:290–314, March 2006. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09944.x.
- C. Jordi, M. Gebran, J. M. Carrasco, J. de Bruijne, H. Voss, C. Fabricius, J. Knude, A. Vallenari, R. Kohley, and A. Mora. Gaia broad band photometry. *A&A*, 523:A48, November 2010. doi: 10.1051/0004-6361/201015441.
- A. Karmampelas, E. Kontizas, A. Dapergolas, E. Livanou, M. Kontizas, I. Bellas-Velidis, and J. M. Vílchez. Star Complexes and Stellar Populations in NGC 6822. In K. Tsinganos, D. Hatzidimitriou, and T. Matsakos, editors, *9th International Conference of the Hellenic Astronomical Society*, volume 424 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 240, July 2010.
- A. Karmampelas, M. Kontizas, B. Rocca-Volmerange, I. Bellas-Velidis, E. Kontizas, E. Livanou, P. Tsalmantza, and A. Dapergolas. Synthetic galaxy spectra (Karmampelas+, 2012). *VizieR Online Data Catalog*, 353:89038, November 2011.
- A. Karmampelas, M. Kontizas, B. Rocca-Volmerange, I. Bellas-Velidis, E. Kontizas, E. Livanou, P. Tsalmantza, and A. Dapergolas. Optimization of synthetic galaxy spectra. Application to ESA’s Gaia mission. *A&A*, 538:A38, February 2012. doi: 10.1051/0004-6361/201117872.
- M. Kontizas, I. Bellas-Velidis, B. Rocca-Volmerange, E. Kontizas, P. Tsalmantza, E. Livanou, A. Dapergolas, and A. Karmampelas. The Unresolved Galaxies with Gaia. In *EAS Publications Series*, volume 45 of *EAS Publications Series*, pages 337–342, February 2011. doi: 10.1051/eas/1045057.
- D. Le Borgne and B. Rocca-Volmerange. Photometric redshifts from evolutionary synthesis with PÉGASE: The code Z-PEG and the $z=0$ age constraint. *A&A*, 386:446–455, May 2002. doi: 10.1051/0004-6361:20020259.
- T. Lejeune, F. Cuisinier, and R. Buser. Standard stellar library for evolutionary synthesis. I. Calibration of theoretical spectra. *A&AS*, 125:229–246, October 1997. doi: 10.1051/aas:1997373.
- T. Lejeune, F. Cuisinier, and R. Buser. A standard stellar library for evolutionary synthesis. II. The M dwarf extension. *A&AS*, 130:65–75, May 1998. doi: 10.1051/aas:1998405.
- S. Longair. *Galaxy Formation*. Astronomy and Astrophysics Library. Springer, 2008. ISBN 9783540734772.

- D. S. Madgwick, A. L. Coil, C. J. Conselice, M. C. Cooper, M. Davis, R. S. Ellis, S. M. Faber, D. P. Finkbeiner, B. Gerke, P. Guhathakurta, N. Kaiser, D. C. Koo, J. A. Newman, A. C. Phillips, C. C. Steidel, B. J. Weiner, C. N. A. Willmer, R. Yan, and Deep2 Survey Team. The DEEP2 Galaxy Redshift Survey: Spectral Classification of Galaxies at $z \sim 1$. *ApJ*, 599: 997–1005, December 2003. doi: 10.1086/379626.
- L. P. Martins and P. Coelho. Testing the accuracy of synthetic stellar libraries. *MNRAS*, 381:1329–1346, November 2007. doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.11954.x.
- M. L. Mateo. Dwarf Galaxies of the Local Group. *ARA&A*, 36:435–506, 1998. doi: 10.1146/annurev.astro.36.1.435.
- D. Michielsen, S. De Rijcke, H. Dejonghe, W. W. Zeilinger, and G. K. T. Hau. The Puzzlingly Large Ca II Triplet Absorption in Dwarf Elliptical Galaxies. *AJ*, 597:L21–L24, November 2003. doi: 10.1086/379658.
- D. Michielsen, M. Koleva, P. Prugniel, W. W. Zeilinger, S. De Rijcke, H. Dejonghe, A. Pasquali, I. Ferreras, and V. P. Debattista. Toward a Solution for the Ca II Triplet Puzzle: Results from Dwarf Elliptical Galaxies. *AJ*, 670:L101–L104, December 2007. doi: 10.1086/524404.
- U. Munari, R. Sordo, F. Castelli, and T. Zwitter. An extensive library of 2500 10 500 Å synthetic spectra. *A&A*, 442:1127–1134, November 2005. doi: 10.1051/0004-6361:20042490.
- T. Murphy and A. Meiksin. A library of high-resolution Kurucz spectra in the range $\lambda\lambda 3000$ –10 000. *MNRAS*, 351:1430–1438, July 2004. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.07895.x.
- R. Nisbet, J. F. Elder, and G. Miner. *Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications*. Academic Press/Elsevier, 2009.
- K. Pearson. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine Series 6*, 2(11):559–572, 1901.
- A. J. Pickles. A Stellar Spectral Flux Library: 1150–25000 Å. *PASP*, 110: 863–878, July 1998. doi: 10.1086/316197.
- A. C. Quillen and J. Bland-Hawthorn. When is star formation episodic? A delay differential equation ‘negative feedback’ model. *MNRAS*, 386: 2227–2234, June 2008. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13193.x.

- N. C. Rana and S. Basu. Derivation of the age-metallicity relation and initial mass function of stars in the solar neighbourhood. *A&A*, 265:499–503, November 1992.
- P. Re Fiorentin, C. A. L. Bailer-Jones, Y. S. Lee, T. C. Beers, T. Sivarani, R. Wilhelm, C. Allende Prieto, and J. E. Norris. Estimation of stellar atmospheric parameters from SDSS/SEGUE spectra. *A&A*, 467:1373–1387, June 2007. doi: 10.1051/0004-6361:20077334.
- B. D. Ripley. *Pattern Recognition and Neural Networks*. Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, 1996.
- B. Rocca-Volmerange, A. Sourie, A. Karamelas, M. Kontizas, and P. Tsalmantza. Evolution of our galaxy and others with the high-resolution version of the code PÉGASE. In G. Alecian, K. Belkacem, R. Samadi, and D. Valls-Gabaud, editors, *SF2A-2011: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, pages 349–351, December 2011.
- S. Ronen, A. Aragon-Salamanca, and O. Lahav. Principal component analysis of synthetic galaxy spectra. *MNRAS*, 303:284–296, February 1999. doi: 10.1046/j.1365-8711.1999.02222.x.
- R. P. Saglia, C. Maraston, D. Thomas, R. Bender, and M. Colless. The Puzzlingly Small Ca II Triplet Absorption in Elliptical Galaxies. *AJ*, 579:L13–L16, November 2002. doi: 10.1086/344742.
- P. Sanguansat, editor. *Principal Component Analysis - Engineering Applications*. InTech, Rijeka, Croatia, 2012.
- T. A. Smecker-Hane, P. B. Stetson, J. E. Hesser, and D. A. Vandenberg. Episodic Star Formation in the Carina dSph Galaxy. In C. Leitherer, U. Fritze-von-Alvensleben, and J. Huchra, editors, *From Stars to Galaxies: the Impact of Stellar Physics on Galaxy Evolution*, volume 98 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 328, 1996.
- J. E. Steiner, R. B. Menezes, T. V. Ricci, and A. S. Oliveira. PCA Tomography: how to extract information from data cubes. *MNRAS*, 395:64–75, May 2009. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.14530.x.
- G. S. Stinson, J. J. Dalcanton, T. Quinn, T. Kaufmann, and J. Wadsley. Breathing in Low-Mass Galaxies: A Study of Episodic Star Formation. *ApJ*, 667:170–175, September 2007. doi: 10.1086/520504.

- B. G. Tabachnick and L. S. Fidell. *Using Multivariate Statistics (5th Edition)*. Allyn & Bacon, 5 edition, March 2006.
- D. Thomas, C. Maraston, and R. Bender. New clues on the calcium underabundance in early-type galaxies. *MNRAS*, 343:279–283, July 2003. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.06659.x.
- S. K. Tiwari, P. Venkatakrishnan, and K. Sankarasubramanian. Global Twist of Sunspot Magnetic Fields Obtained from High-Resolution Vector Magnetograms. *ApJ*, 702:L133–L137, September 2009. doi: 10.1088/0004-637X/702/2/L133.
- P. Tsalmantza, M. Kontizas, C. A. L. Bailer-Jones, B. Rocca-Volmerange, R. Korakitis, E. Kontizas, E. Livanou, A. Dapergolas, I. Bellas-Velidis, A. Vallenari, and M. Fioc. Towards a library of synthetic galaxy spectra and preliminary results of classification and parametrization of unresolved galaxies for Gaia. *A&A*, 470:761–770, August 2007. doi: 10.1051/0004-6361:20077300.
- P. Tsalmantza, M. Kontizas, B. Rocca-Volmerange, C. A. L. Bailer-Jones, E. Kontizas, I. Bellas-Velidis, E. Livanou, R. Korakitis, A. Dapergolas, A. Vallenari, and M. Fioc. Towards a library of synthetic galaxy spectra and preliminary results of classification and parametrization of unresolved galaxies for Gaia. II. *A&A*, 504:1071–1084, September 2009. doi: 10.1051/0004-6361/200912014.
- P. Tsalmantza, A. Karamelas, M. Kontizas, C. A. L. Bailer-Jones, B. Rocca-Volmerange, E. Livanou, I. Bellas-Velidis, E. Kontizas, and A. Vallenari. A semi-empirical library of galaxy spectra for Gaia classification based on SDSS data and PÉGASE models. *A&A*, 537:A42, January 2012. doi: 10.1051/0004-6361/201117125.
- B. Tso and P. M. Mather. *Classification Methods for Remotely Sensed Data*. Taylor & Francis, London, Great Britain, 2001.
- M. A. Turk and A. P. Pentland. Face Recognition Using Eigenfaces. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 586–591, June 1991a.
- M. A. Turk and A. P. Pentland. Eigenfaces for Recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3(1):71–86, 1991b.

- F. Valdes, R. Gupta, J. A. Rose, H. P. Singh, and D. J. Bell. The Indo-US Library of Coudé Feed Stellar Spectra. *ApJS*, 152:251–259, June 2004. doi: 10.1086/386343.
- Vladimir N. Vapnik. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer-Verlag Inc., New York, 1995.
- A. Vazdekis, A. J. Cenarro, J. Gorgas, N. Cardiel, and R. F. Peletier. Empirical calibration of the near-infrared CaII triplet - IV. The stellar population synthesis models. *MNRAS*, 340:1317–1345, April 2003. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.06413.x.
- Y. Wadadekar. Estimating Photometric Redshifts Using Support Vector Machines. *PASP*, 117:79–85, January 2005. doi: 10.1086/427710.
- J. V. Wall and C. R. Jenkins. *Practical Statistics for Astronomers*. Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, 2001.
- L. Wang, D. Farrah, B. Connolly, N. Connolly, V. Leboutteiller, S. Oliver, and H. Spoon. Principal component analysis of the Spitzer IRS spectra of ultraluminous infrared galaxies. *MNRAS*, 411:1809–1818, March 2011. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17811.x.
- M. I. Wilkinson, A. Vallenari, C. Turon, U. Munari, D. Katz, G. Bono, M. Cropper, A. Helmi, N. Robichon, F. Thévenin, S. Vidrih, T. Zwitter, F. Arenou, M.-O. Baylac, G. Bertelli, A. Bijaoui, F. Boschi, F. Castelli, F. Crifo, M. David, A. Gomboc, A. Gómez, M. Haywood, U. Jauregi, P. de Laverny, Y. Lebreton, P. Marrese, T. Marsh, S. Mignot, D. Morin, S. Pasetto, M. Perryman, A. Prša, A. Recio-Blanco, F. Royer, A. Sellier, A. Siviero, R. Sordo, C. Soubiran, L. Tomasella, and Y. Viala. Spectroscopic survey of the Galaxy with Gaia- II. The expected science yield from the Radial Velocity Spectrometer. *MNRAS*, 359:1306–1335, June 2005. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09012.x.
- P. R. Woźniak, S. J. Williams, W. T. Vestrand, and V. Gupta. Identifying Red Variables in the Northern Sky Variability Survey. *AJ*, 128:2965–2976, December 2004. doi: 10.1086/425526.
- C. W. Yip, A. J. Connolly, A. S. Szalay, T. Budavári, M. SubbaRao, J. A. Frieman, R. C. Nichol, A. M. Hopkins, D. G. York, S. Okamura, J. Brinkmann, I. Csabai, A. R. Thakar, M. Fukugita, and Ž. Ivezić. Distributions of Galaxy Spectral Types in the Sloan Digital Sky Survey. *AJ*, 128:585–609, August 2004. doi: 10.1086/422429.

- W. Yongxu, A. Xinyu, D. Yuanfeng, and L. Yongping. A Fingerprint Recognition Algorithm Based on Principal Component Analysis. In *TENCON 2006. 2006 IEEE Region 10 Conference*, pages 1–4, November 2006.

Κατάλογος Σχημάτων

- 1.1 Η εξέλιξη της ακρίβειας των αστρομετρικών μετρήσεων (σε δευτερόλεπτα τόξου) από την αρχαιότητα έως σήμερα. Copyright: Eric Høg. 25
- 1.2 Η απογείωση του οχήματος εκτόξευσης Soyuz από το διαστημικό κέντρο της γαλλικής Γουιάνα στις 21 Οκτωβρίου 2011, με φορτίο τους δύο πρώτους δορυφόρους Galileo. Copyright: ESA/CNES/ARIANESPACE - S. Corvaja, 2011. 27
- 1.3 Σχηματική αναπαράσταση του νόμου σάρωσης του ουρανού που πρόκειται να χρησιμοποιήσει ο δορυφόρος Gaia. Copyright: Jos de Bruijne / ESA. 28
- 1.4 Σχηματική αναπαράσταση της έδρας των οπτικών, του συστήματος των κατόπτρων (M1/M'1-M6) και του εστιακού επιπέδου (κάτω δεξιά). Copyright: EADS Astrium. 30
- 1.5 Πάνω: Το πλήρες σύνολο των 106 CCDs που απαρτίζουν το εστιακό επίπεδο του δορυφόρου Gaia. Κάτω: Σχηματική αναπαράσταση του εστιακού επιπέδου. Copyright: EADS Astrium. 32
- 1.6 Σχηματική αναπαράσταση της συστοιχίας των CCDs του εστιακού επιπέδου του δορυφόρου Gaia. Copyright: Alexander Short - ESA. 33
- 1.7 Πάνω: Η διαρθρωτική δομή της μηχανολογικής και της ηλεκτρολογικής μονάδας του δορυφόρου Gaia. Κάτω: Το αλεξήλιο του δορυφόρου Gaia σε πλήρη ανάπτυξη. Copyright: Astrium France 34
- 1.8 Πάνω: Τα πρίσματα του μπλε (BP) και του κόκκινου (RP) φωτομέτρου. Copyright: EADS Astrium. 37
- 1.9 Ο χάρτης της κατανομής των ανθρώπινων πόρων της κοινοπραξίας DPAC ανά κράτος (Ιανουάριος 2012). 39
- 1.10 Δύο ενδεικτικά συνθετικά φάσματα γαλαξιών του κώδικα PÉGASE, εκ των οποίων το ένα αντιστοιχεί σε σπειροειδή γαλαξία (πάνω) και το άλλο σε γαλαξία προγενέστερου φασματικού τύπου (κάτω). 45

- 2.1 Η συχνότητα ταύτισης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών με τα φάσματα γαλαξιών του SDSS, για κάθε φασματικό τύπο. Κάθε γαλαξίας αντιπροσωπεύεται από τον αύξοντα αριθμό του. . . 61
- 2.2 Σχηματική αναπαράσταση του πίνακα σύγχυσης (confusion matrix) των προσομοιωμένων φασμάτων των γαλαξιών της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης του δείγματος εκπαίδευσης μεγέθους $G = 15$ (πάνω αριστερά), 18 (πάνω δεξιά) και 20 (κάτω), αντίστοιχα. 64
- 2.3 Σχηματική αναπαράσταση του πίνακα σύγχυσης (confusion matrix) των προσομοιωμένων φασμάτων των γαλαξιών της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης του δείγματος δοκιμών μεγέθους $G = 15$ (πάνω αριστερά), 18 (πάνω δεξιά) και 20 (κάτω), αντίστοιχα. 66
- 2.4 Το ποσοστό των επιτυχών ταξινομήσεων των προσομοιωμένων φασμάτων των γαλαξιών της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης του δείγματος δοκιμών συναρτήσει του μεγέθους G για το σύνολο των φασμάτων αυτών και για κάθε φασματικό τύπο ξεχωριστά. . 67
- 2.5 Η κατανομή των ορθά ταξινομημένων (γκρι) και των εσφαλμένα ταξινομημένων (μαύρο) προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης του δείγματος δοκιμών στο εύρος της ερυθρομετατόπισης z , για τα μεγέθη $G = 15$ (πάνω αριστερά), 18 (πάνω δεξιά) και 20 (κάτω), αντίστοιχα. 69
- 2.6 Οι προβλεφθείσες τιμές της ερυθρομετατόπισης z των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης συναρτήσει των αντίστοιχων πραγματικών τιμών για το μέγεθος $G = 15$ και για κάθε φασματικό τύπο. Η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει την ιδανική περίπτωση της ορθής πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, ενώ η μπλε γραμμή αποτελεί τη γραμμική προσαρμογή που χαρακτηρίζει τα αποτελέσματα του δείγματος δοκιμών. 71
- 2.7 Οι προβλεφθείσες τιμές της ερυθρομετατόπισης z των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης συναρτήσει των αντίστοιχων πραγματικών τιμών των ορθά ταξινομημένων (μπλε αστερίσκοι) και των εσφαλμένα ταξινομημένων (κόκκινοι αστερίσκοι) φασμάτων μεγέθους $G = 15$. Η μαύρη γραμμή υποδεικνύει την ιδανική περίπτωση της ορθής πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, ενώ η μπλε και η κόκκινη γραμμή αποτελούν τις γραμμικές προσαρμογές που χαρακτηρίζουν τους ορθά και τους εσφαλμένα ταξινομημένους γαλαξίες του δείγματος δοκιμών. 72

- 2.8 Οι προβλεφθείσες τιμές της ερυθρομετατόπισης z των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης συναρτήσει των αντίστοιχων πραγματικών τιμών για το μέγεθος $G = 18$ και για κάθε φασματικό τύπο. Η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει την ιδανική περίπτωση της ορθής πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, ενώ η μπλε γραμμή αποτελεί τη γραμμική προσαρμογή που χαρακτηρίζει τα αποτελέσματα του δείγματος δοκιμών. 73
- 2.9 Οι προβλεφθείσες τιμές της ερυθρομετατόπισης z των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης συναρτήσει των αντίστοιχων πραγματικών τιμών των ορθά ταξινομημένων (μπλε αστερίσκοι) και των εσφαλμένα ταξινομημένων (κόκκινοι αστερίσκοι) φασμάτων μέγεθους $G = 18$. Η μαύρη γραμμή υποδεικνύει την ιδανική περίπτωση της ορθής πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, ενώ η μπλε και η κόκκινη γραμμή αποτελούν τις γραμμικές προσαρμογές που χαρακτηρίζουν τους ορθά και τους εσφαλμένα ταξινομημένους γαλαξίες του δείγματος δοκιμών. 74
- 2.10 Οι προβλεφθείσες τιμές της ερυθρομετατόπισης z των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης συναρτήσει των αντίστοιχων πραγματικών τιμών για το μέγεθος $G = 20$ και για κάθε φασματικό τύπο. Η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει την ιδανική περίπτωση της ορθής πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, ενώ η μπλε γραμμή αποτελεί τη γραμμική προσαρμογή που χαρακτηρίζει τα αποτελέσματα του δείγματος δοκιμών. 75
- 2.11 Οι προβλεφθείσες τιμές της ερυθρομετατόπισης z των προσομοιωμένων φασμάτων της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης συναρτήσει των αντίστοιχων πραγματικών τιμών των ορθά ταξινομημένων (μπλε αστερίσκοι) και των εσφαλμένα ταξινομημένων (κόκκινοι αστερίσκοι) φασμάτων μέγεθους $G = 20$. Η μαύρη γραμμή υποδεικνύει την ιδανική περίπτωση της ορθής πρόβλεψης της ερυθρομετατόπισης, ενώ η μπλε και η κόκκινη γραμμή αποτελούν τις γραμμικές προσαρμογές που χαρακτηρίζουν τους ορθά και τους εσφαλμένα ταξινομημένους γαλαξίες του δείγματος δοκιμών. 76
- 2.12 Το πρώτο (επάνω), το δεύτερο (κέντρο) και το τρίτο (κάτω) ιδιοδιάνυσμα της βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών, όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου PCA. . . 81

- 2.13 Επάνω: Το σφάλμα ανακατασκευής για το σύνολο και τους επιμέρους φασματικούς τύπους των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. Το διάγραμμα παρουσιάζει τη συνεισφορά έως και του τέταρτου ιδιοδιανύσματος, στον οποίο το σφάλμα ανακατασκευής πρακτικά μηδενίζεται για όλους τους φασματικούς τύπους. Κάτω: Ένα παράδειγμα ανακατασκευής ενός συνθετικού φάσματος γαλαξία (μαύρο), με τη χρήση του πρώτου (μπλε) και των δύο πρώτων (πράσινο) κυρίων συνιστωσών. 83
- 2.14 Τα δύο σημαντικότερα ιδιοδιανύσματα, όταν η μέθοδος PCA εφαρμόζεται στα συνθετικά φάσματα κάθε φασματικού τύπου ξεχωριστά. 85
- 2.15 Προβολή των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών (Tsalmantza et al., 2009) στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 όλων των φασματικών τύπων ταυτόχρονα. 86
- 2.16 Προβολή των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών (Tsalmantza et al., 2009) στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 για κάθε φασματικό τύπο. 87
- 2.17 Η κατανομή των συνδυασμών των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_1 και p_2 των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου, σε σχέση με την κανονικοποιημένη ποσότητα αερίου που διαθέτουν. Στα αριστερά της έντονης μαύρης γραμμής βρίσκονται τα φάσματα που δεν έχουν γραμμές εκπομπής. 90
- 2.18 Διερεύνηση των ιδιοτήτων των συνθετικών φασμάτων προγενέστερου φασματικού τύπου, ανάλογα με την ύπαρξη ή μη γραμμών εκπομπής και την ένταση της αστρογένεσης. Πρώτη σειρά: Το διάγραμμα $p_1 - p_2$ των αντίστοιχων παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας για κάθε επιλεγμένη ομάδα φασμάτων. Στα αριστερά της έντονης μαύρης γραμμής βρίσκονται τα φάσματα που δεν έχουν γραμμές εκπομπής. Δεύτερη σειρά: Τα αντίστοιχα διαγράμματα δύο χρωμάτων $(g - r) - (r - i)$ των φασμάτων αυτών, των φασμάτων του SDSS και των συνθετικών σπειροειδών γαλαξιών (πράσινο). Τρίτη σειρά: Τα αντίστοιχα μέσα φάσματα. Τέταρτη σειρά: Παραδείγματα της χρονικής εξέλιξης του κανονικοποιημένου ρυθμού αστρικής δημιουργίας για ένα γαλαξία από κάθε επιλεγμένη ομάδα. 93
- 2.19 Προβολή των συνθετικών φασμάτων προγενέστερου φασματικού τύπου στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2, για κάθε μία από τις τρεις υπό μελέτη κατηγορίες: Φάσματα με γραμμές εκπομπής (μπλε), χωρίς γραμμές εκπομπής (κόκκινο) και χωρίς γραμμές εκπομπής με χαμηλό ρυθμό αστρικής δημιουργίας (πορτοκαλί). 94

2.20	Εποπτική παράθεση των βέλτιστων (πάνω) και των περικομμένων (κάτω) συνθετικών φασμάτων γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου.	95
2.21	Προβολή των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 για διάφορα εύρη των παραμέτρων p_1 (πρώτη σειρά) και p_2 (δεύτερη σειρά).	96
2.22	Απεικόνιση της αρχικού ρυθμού αστρικής δημιουργίας των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου (p_2/p_1) συναρτήσει του χρόνου στον οποίο ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας είναι e φορές μικρότερος του αρχικού, σε λογαριθμική κλίμακα. Τα κόκκινα σημεία αντιστοιχούν στα βέλτιστα φάσματα.	97
2.23	Επίδραση της παραμέτρου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_1 στον κανονικοποιημένο ρυθμό αστρικής δημιουργίας στην περίπτωση των σπειροειδών γαλαξιών.	100
2.24	Επίδραση της παραμέτρου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_2 στον κανονικοποιημένο ρυθμό αστρικής δημιουργίας στην περίπτωση των σπειροειδών γαλαξιών.	101
2.25	Επίδραση της παραμέτρου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας t_{infall} στον κανονικοποιημένο ρυθμό αστρικής δημιουργίας στην περίπτωση των σπειροειδών γαλαξιών.	102
2.26	Προβολή των συνθετικών φασμάτων σπειροειδών γαλαξιών στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 για διάφορα εύρη των παραμέτρων p_1 (πρώτη σειρά), p_2 (δεύτερη σειρά) και t_{infall} (τρίτη σειρά).	103
2.27	Εποπτική παράθεση των βέλτιστων (πάνω) και των περικομμένων (κάτω) συνθετικών φασμάτων σπειροειδών γαλαξιών.	104
2.28	Επίδραση της παραμέτρου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_1 στον κανονικοποιημένο ρυθμό αστρικής δημιουργίας στην περίπτωση των ανώμαλων γαλαξιών.	106
2.29	Επίδραση της παραμέτρου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας p_2 στον κανονικοποιημένο ρυθμό αστρικής δημιουργίας στην περίπτωση των ανώμαλων γαλαξιών.	107
2.30	Επίδραση της παραμέτρου του ρυθμού αστρικής δημιουργίας t_{infall} στον κανονικοποιημένο ρυθμό αστρικής δημιουργίας στην περίπτωση των ανώμαλων γαλαξιών.	108
2.31	Προβολή των συνθετικών φασμάτων ανώμαλων γαλαξιών στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 για διάφορα εύρη των παραμέτρων p_1 (πρώτη σειρά), p_2 (δεύτερη σειρά) και t_{infall} (τρίτη σειρά).	109

- 2.32 Το διάγραμμα δύο χρωμάτων $(g-r) - (r-i)$ των συνθετικών ανώμαλων γαλαξιών για κάθε αναγραφόμενο εύρος της παραμέτρου t_{infall} (κόκκινα σημεία), σε σχέση με το σύνολο των συνθετικών ανώμαλων γαλαξιών (μαύρα σημεία). 110
- 2.33 Εποπτική παράθεση των βέλτιστων (πάνω) και των περικομμένων (κάτω) συνθετικών φασμάτων ανώμαλων γαλαξιών. 111
- 2.34 Προβολή των συνθετικών φασμάτων των QSFG στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 για διάφορα εύρη των παραμέτρων p_1 (πρώτη σειρά), p_2 (δεύτερη σειρά), p_3 (τρίτη σειρά) και t_{infall} (τέταρτη σειρά). 113
- 2.35 Η κατανομή των συνθετικών γαλαξιών QSFG στο διάγραμμα δύο χρωμάτων $(g-r) - (r-i)$ για τις διάφορες περιπτώσεις της παραμέτρου p_3 . Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζεται και η αντίστοιχη κατανομή των ανώμαλων συνθετικών γαλαξιών (μαύρα σημεία). 114
- 2.36 Τα μέσα φάσματα των QSFG για διάφορα εύρη τιμών της παραμέτρου p_3 του ρυθμού αστρικής δημιουργίας. 115
- 2.37 Εποπτική παράθεση των βέλτιστων (πάνω) και των περικομμένων (κάτω) συνθετικών φασμάτων των γαλαξιών QSFG. 116
- 2.38 Προβολή των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 όλων των φασματικών τύπων ταυτόχρονα. 119
- 2.39 Προβολή των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στις δύο κυριότερες συνιστώσες PC1 και PC2 για κάθε φασματικό τύπο. 120
- 2.40 Η κατανομή των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στο διάγραμμα των δύο χρωμάτων $(g-r) - (r-i)$ πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την πραγματοποιηθείσα βελτιστοποίηση, σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή των παρατηρούμενων φασμάτων γαλαξιών από το SDSS (μαύρα σημεία). 122
- 2.41 Όμοια με το σχήμα 2.40, για τους γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου και τους σπειροειδείς. 123
- 2.42 Όμοια με το σχήμα 2.40, για τους ανώμαλους γαλαξίες και τους QSFG. 124
- 2.43 Ένα δείγμα πέντε βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών, όπως αυτά αποτυπώνονται με τη βοήθεια του εργαλείου απεικόνισης της υπηρεσίας Vizier. 125
- 2.44 Ένα τμήμα του καταλόγου των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών από το αντίστοιχο αρχείο spectra.fit. 126

- 2.45 Απόδοση του UGC στην ταξινόμηση των ρεαλιστικών προσομοιωμένων φασμάτων, ορισμένη ως το ποσοστό των επιτυχών προβλέψεων του φασματικού τύπου. Κάθε ζεύγος ράβδων αποδίδει τις επιτυχείς προβλέψεις του συγκεκριμένου φασματικού τύπου, πριν (αριστερή ράβδος) και μετά (δεξιά ράβδος) τη βελτιστοποίηση. 129
- 2.46 Απόδοση του UGC στην παραμετροποίηση των καθαρών προσομοιωμένων φασμάτων, ορισμένη ως η διάμεσος τιμή των απόλυτων εκατοστιαίων σφαλμάτων παραμετροποίησης. Κάθε ζευγάρι ράβδων αποδίδει τα σφάλματα αυτά πριν (αριστερή ράβδος) και μετά (δεξιά ράβδος) τη βελτιστοποίηση, των εξής παραμέτρων: p_1 και p_2 των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου, p_1 , p_2 και t_{infall} των σπειροειδών γαλαξιών, p_1 , p_2 και t_{infall} των ανώμαλων γαλαξιών, p_1 , p_2 , p_3 και t_{infall} των ΧΣΦΓ, ερυθρομετατόπιση και απορρόφηση. 130
- 2.47 Η σχέση κοσμικού χρόνου - ερυθρομετατόπισης, κανονικοποιημένη για την περίπτωση των γαλαξιών της νέας συνθετικής βιβλιοθήκης. 134
- 2.48 Ιστογράμματα και διαγράμματα που χαρακτηρίζουν τα συνθετικά φάσματα των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου της νέας βιβλιοθήκης. 137
- 2.49 Δείγμα φασμάτων των γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου της νέας βιβλιοθήκης. 138
- 2.50 Ιστογράμματα και διαγράμματα που χαρακτηρίζουν τα συνθετικά φάσματα των σπειροειδών γαλαξιών της νέας βιβλιοθήκης, για γωνία κλίσης $i = 60^\circ$ 139
- 2.51 Δείγμα φασμάτων των σπειροειδών γαλαξιών της νέας βιβλιοθήκης, για γωνία κλίσης $i = 60^\circ$ 140
- 2.52 Ιστογράμματα και διαγράμματα που χαρακτηρίζουν τα συνθετικά φάσματα των ανώμαλων γαλαξιών της νέας βιβλιοθήκης, για γωνία κλίσης $i = 0^\circ$ 141
- 2.53 Δείγμα φασμάτων των ανώμαλων γαλαξιών της νέας βιβλιοθήκης, για γωνία κλίσης $i = 0^\circ$ 142
- 2.54 Ιστογράμματα και διαγράμματα που χαρακτηρίζουν τα συνθετικά φάσματα των QSFG της νέας βιβλιοθήκης, για γωνία κλίσης $i = 30^\circ$ 143
- 2.55 Δείγμα φασμάτων των QSFG της νέας βιβλιοθήκης, για γωνία κλίσης $i = 30^\circ$ 144
- 2.56 Διαφορετικά σενάρια των γαλαξιών επεισοδιακής αστρογέννησης. 147
- 2.57 Συνθετικό φάσμα γαλαξία προγενέστερου φασματικού τύπου με ρυθμό αστρικής δημιουργίας ανάλογο με τη μάζα του αερίου, σε διάφορες ηλικίες και με την προσθήκη του τμήματος του φάσματος που αντιστοιχεί στον φασματογράφο RVS. 153

- 2.58 Συνθετικό φάσμα γαλαξία προγενέστερου φασματικού τύπου με ρυθμό αστρικής δημιουργίας ανάλογο με τη μάζα του αερίου και αρχική συνάρτηση μάζας Salpeter, σε διάφορες ηλικίες και με την προσθήκη του τμήματος του φάσματος που αντιστοιχεί στον φασματογράφο RVS. 154
- 2.59 Συνθετικό φάσμα γαλαξία προγενέστερου φασματικού τύπου με ρυθμό αστρικής δημιουργίας που μειώνεται εκθετικά, σε διάφορες ηλικίες και με την προσθήκη του τμήματος του φάσματος που αντιστοιχεί στον φασματογράφο RVS. 155
- 2.60 Συνθετικό φάσμα σπειροειδούς γαλαξία, σε διάφορες ηλικίες και με την προσθήκη του τμήματος του φάσματος που αντιστοιχεί στον φασματογράφο RVS. 156
- 2.61 Συνθετικό φάσμα ανώμαλου γαλαξία, σε διάφορες ηλικίες και με την προσθήκη του τμήματος του φάσματος που αντιστοιχεί στον φασματογράφο RVS. 157
- 4.1 Δείγμα βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών προγενέστερου φασματικού τύπου, επιλεγμένων με τυχαίο τρόπο. 169
- 4.2 Δείγμα βέλτιστων συνθετικών φασμάτων σπειροειδών γαλαξιών, επιλεγμένων με τυχαίο τρόπο. 170
- 4.3 Δείγμα βέλτιστων συνθετικών φασμάτων ανώμαλων γαλαξιών, επιλεγμένων με τυχαίο τρόπο. 171
- 4.4 Δείγμα βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών QSFG, επιλεγμένων με τυχαίο τρόπο. 172
- 4.5 Συνιστώσες $PC1 - PC9$ των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. 175
- 4.6 Συνιστώσες $PC10 - PC18$ των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. 176
- 4.7 Συνιστώσες $PC19 - PC27$ των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. 177
- 4.8 Προβολή των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών για όλους τους ανά δύο συνδυασμούς των συνιστωσών $PC1$ έως $PC4$. Οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου, οι σπειροειδείς γαλαξίες, οι ανώμαλοι γαλαξίες και οι γαλαξίες QSFG συμβολίζονται με κόκκινα, πράσινα, κίτρινα και μπλε σημεία, αντίστοιχα. 179

- 4.9 Προβολή των βέλτιστων συνθετικών φασμάτων γαλαξιών στις συνιστώσες PC1, PC2 και PC3 πριν (πάνω) και μετά (κάτω) τη βελτιστοποίηση. Οι γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου, οι σπειροειδείς γαλαξίες, οι ανώμαλοι γαλαξίες και οι γαλαξίες QSFG συμβολίζονται με κόκκινα, πράσινα, κίτρινα και μπλε σημεία, αντίστοιχα. 180

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Οι συντονιστικές μονάδες της κοινοπραξίας DPAC.	40
1.2	Τα κέντρα επεξεργασίας δεδομένων της κοινοπραξίας DPAC. . .	40
1.3	Οι κώδικες προγραμματισμού που απαρτίζουν το μοντέλο PÉGASE και οι λειτουργίες που επιτελούν.	45
1.4	Ο ρυθμός αστρικής δημιουργίας και το εύρος των παραμέτρων του για κάθε φασματικό τύπο γαλαξιών της συνθετικής βιβλιοθήκης. Οι παράμετροι p_1 και p_2 αντιστοιχούν στους εκάστοτε νόμους αστρικής δημιουργίας.	48
2.1	Ο αριθμός των γαλαξιών του SDSS που ταυτοποιήθηκαν σε κάθε φασματικό τύπο της βιβλιοθήκης των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών.	60
2.2	Ο πίνακας σύγχυσης (confusion matrix) των προσομοιωμένων φασμάτων γαλαξιών της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης του δείγματος εκπαίδευσης για τα μεγέθη $G = 15, 18$ και 20 . Σε κάθε μία κατηγορία του μεγέθους G , οι στήλες αντιπροσωπεύουν τους αληθείς φασματικούς τύπους και οι σειρές τους προβλεφθέντες. Τα σύμβολα E, S, I και QSFG αντιστοιχούν σε γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου, σπειροειδείς, ανώμαλους και QS-FG, αντίστοιχα. Οι τιμές είναι ποσοστά επί τοις εκατό.	63
2.3	Ο πίνακας σύγχυσης (confusion matrix) των προσομοιωμένων φασμάτων γαλαξιών της ημι-εμπειρικής βιβλιοθήκης του δείγματος δοκιμών για τα μεγέθη $G = 15, 18$ και 20 . Σε κάθε μία κατηγορία του μεγέθους G , οι στήλες αντιπροσωπεύουν τους αληθείς φασματικούς τύπους και οι σειρές τους προβλεφθέντες. Τα σύμβολα E, S, I και QSFG αντιστοιχούν σε γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου, σπειροειδείς, ανώμαλους και QS-FG, αντίστοιχα. Οι τιμές είναι ποσοστά επί τοις εκατό.	65

- 2.4 Ο πίνακας σύγχυσης (confusion matrix) των προσομοιωμένων φασμάτων των γαλαξιών της συνθετικής βιβλιοθήκης του δείγματος δοκιμών μεγέθους $G = 18.5$ (Tsalmantza et al., 2009). Οι στήλες αντιπροσωπεύουν τους αληθείς φασματικούς τύπους και οι σειρές τους προβλεπθέντες. Τα σύμβολα E, S, I και QSFG αντιστοιχούν σε γαλαξίες προγενέστερου φασματικού τύπου, σπειροειδείς, ανώμαλους και QSFG, αντίστοιχα. Οι τιμές είναι ποσοστά επί τοις εκατό. 67
- 2.5 Το μέσο απόλυτο σφάλμα των προβλέψεων της ερυθρομετατόπισης για τα διάφορα μεγέθη G . Στις παρενθέσεις παρατίθενται οι τιμές των μέσων απόλυτων εκατοστιαίων σφαλμάτων των γαλαξιών με $z \leq 0.2$ 70
- 2.6 Το ποσοστό επί της συνολικής διαχύμανσης, το αθροιστικό ποσοστό και το σφάλμα ανακατασκευής των πέντε σημαντικότερων ιδιοδιανυσμάτων των συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. 80
- 2.7 Το ποσοστό επί της συνολικής διαχύμανσης των δύο σημαντικότερων ιδιοδιανυσμάτων για τυχαίως επιλεγμένα επιμέρους δείγματα της φασματικής βιβλιοθήκης. Η εφαρμογή της μεθόδου PCA έλαβε χώρα δέκα φορές για κάθε επιμέρους δείγμα. 84
- 2.8 Το βέλτιστο εύρος των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας για κάθε φασματικό τύπο γαλαξιών της συνθετικής βιβλιοθήκης. Οι παράμετροι p_1 και p_2 αντιστοιχούν στους εκάστοτε νόμους αστρικής δημιουργίας. 118
- 2.9 Ο αριθμός των φασμάτων γαλαξιών που περιέχονται στην αρχική συνθετική βιβλιοθήκη και στη βέλτιστη συνθετική βιβλιοθήκη, για κάθε φασματικό τύπο. 118
- 2.10 Η κατανομή των γαλαξιών της νέας συνθετικής βιβλιοθήκης στα διάφορα επιμέρους εύρη των τιμών των παραμέτρων του ρυθμού αστρικής δημιουργίας, για συγκεκριμένο εύρος ερυθρομετατόπισης και κλίση γωνίας δίσκου. 132
- 2.11 Ενδεικτικές αντιστοιχίες ερυθρομετατόπισης - ηλικίας, κανονικοποιημένες για την περίπτωση της νέας βιβλιοθήκης συνθετικών φασμάτων γαλαξιών. Οι αντιστοιχίες όπου $z = 0.4$ και $z = 0.6$ αναφέρονται στην ειδική περίπτωση των LRG. 135
- 2.12 Οι παράμετροι του ρυθμού αστρικής δημιουργίας του σεναρίου των γαλαξιών επεισοδιακής αστρογέννησης και οι τιμές που δύνανται να λάβουν. 147