



Universiteit
Leiden
The Netherlands

The alignment of galaxies across all scales

Georgiou, C.

Citation

Georgiou, C. (2019, December 12). *The alignment of galaxies across all scales*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/81574>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/81574>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The following handle holds various files of this Leiden University dissertation:
<http://hdl.handle.net/1887/81574>

Author: Georgiou, C.

Title: The alignment of galaxies across all scales

Issue Date: 2019-12-12

Σύνοψη

Η κοσμολογία έχει τραβήξει μεγάλο ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες, με τη βελτίωση αστρονομικών δεδομένων και την αύξηση στην ακρίβεια με την οποία μπορούμε να μετρήσουμε στατιστικές παρατηρήσιμες ποσότητες στο Σύμπαν. Η γενική εικόνα των φυσικών διεργασιών που διαπρέπουν την εξέλιξη του Σύμπαντος συνοψίζεται στο καθιερωμένο κοσμολογικό μοντέλο, το οποίο επιτυγχάνει στο να περιγράψει ολόένα και πιο ακριβείς μετρήσεις από ανεξάρτητες αστρονομικές παρατηρήσεις.

Τα μεγαλύτερα ερωτήματα που δεν έχουν ακόμη απαντηθεί εντός του καθιερωμένου κοσμολογικού μοντέλου αφορούν τη σκοτεινή ύλη και σκοτεινή ενέργεια, στοιχεία που ευθύνονται για το $\sim 95\%$ της ενεργειακής πυκνότητας του Σύμπαντος σήμερα. Η σκοτεινή ύλη αυξάνει το ρυθμό της δημιουργίας δομών ενώ η σκοτεινή ενέργεια κάνει το αντίθετο. Μερικά από τα βασικά ερωτήματα περί αυτών των μυστήριων στοιχείων του Σύμπαντος είναι: πόση σκοτεινή ύλη υπάρχει και πόσο έντονα σπννεύει (που κωδικοποιούνται στην κοσμολογική παράμετρο S_8); Υπάρχει ασυμφωνία στην παράμετρο S_8 μεταξύ αστρονομικών παρατηρήσεων του πρώιμου και τωρινού σύμπαντος; Ποια είναι η καταστατική εξίσωση της σκοτεινής ενέργειας (παραμετροποιημένη από την w); Είναι κοσμολογική σταθερά ή μεταβάλλεται με το χρόνο;

Παρατηρησιακές τεχνικές ευαίσθητες στη σκοτεινή ύλη και σκοτεινή ενέργεια απαιτούνται για να ρίξουμε φως σε αυτές τις ερωτήσεις. Μία τέτοια τεχνική είναι μέσω σπννεύεις βαρυτικών φακών, οι οποίοι διαστρεβλώνουν το φως (π.χ. από μακρινούς γαλαξίες) λόγω της ύλης μεταξύ της πηγής φωτός και του παρατηρητή. Η διαστρέβλωση που προκαλούν οι βαρυτικοί φακοί εξαρτάται από την μάζα και γε-

ωμετρία του σύμπαντος, πράγμα το οποίο τους καθιστά κατάλληλους για μελέτες της σκοτεινής ύλης και σκοτεινής ενέργειας. Μελλοντικές έρευνες με ασθενείς βαρυτικούς φακούς έχουν στόχο να αυξήσουν δραματικά τη στατιστική ακρίβεια με την οποία μετράμε αυτή τη διαστρέβλωση. Ωστόσο, αυτό σημαίνει πως το συστηματικό σφάλμα αυτών των μετρήσεων θα πρέπει να προσδιοριστεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Το πιο σημαντικό συστηματικό σφάλμα που πηγάζει από αστροφυσικά φαινόμενα είναι λόγω ευθυγράμμισης των γαλαξιών, οι οποίοι τείνουν να ευθυγραμμίζουν το σχήμα τους με την κατανομή μάζας στο σύμπαν. Η ευθυγράμμιση αυτή προσθέτει ένα μοτίβο διαστρέβλωσης στα παρατηρησιακά δεδομένα το οποίο δεν οφείλεται στους βαρυτικούς φακούς και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά εσφαλμένες μετρήσεις κοσμολογικών παραμέτρων, αν δεν ληφθεί υπ' όψη. Σε αυτή την εργασία, μετράμε το σήμα της διαστρέβλωσης λόγω ευθυγραμμίσεων των γαλαξιών με αστρονομικές παρατηρήσεις πρωτοφανής ποιότητας εικόνων και δεδομένων, και εξετάζουμε την εξάρτηση του σήματος με διάφορες ιδιότητες των γαλαξιών. Η γνώση αυτή καθιστά εφικτή την ανάπτυξη ακριβή μοντέλων του σήματος λόγω ευθυγράμμισης γαλαξιών, που με τη σειρά τους βοηθούν στο να απαλλάξουμε τη μέτρηση βαρυτικών φακών από αυτό το σήμα και να χρησιμοποιήσουμε καθολικά τη στατιστική δύναμη των μελλοντικών ερευνών.

Για να μετρήσουμε το σήμα από την ευθυγράμμιση γαλαξιών, χρειάζεται να γνωρίζουμε την απόσταση των γαλαξιών από εμάς (ή αλλιώς την ερυθρομετάθεσή τους), ώστε να αναγνωρίσουμε τα φυσικώς συνδεδεμένα ζεύγη γαλαξιών που αλληλεπιδρούν βαρυτικά, καθώς επίσης και βαθιές αστρονομικές εικόνες υψηλής ποιότητας για να προσδιορίσουμε σχήματα γαλαξιών και να ποσοτικοποιήσουμε την ευθυγράμμισή τους. Σε αυτή την εργασία, μετρήσεις ερυθρομετάθεσης υψηλής ακρίβειας παρέχονται από την φασματοσκοπική έρευνα Galaxy And Mass Assembly (GAMA). Τα δεδομένα της έρευνας παρέχουν μετρήσεις για τους περισσότερους γαλαξίες στο δείγμα μας, ακόμη και για γαλαξίες πολύ κοντά ο ένας με τον άλλο στον ουρανό, και κάνουν εφικτή τη μέτρηση του σήματος ευθυγραμμίσεων σε μεγάλες και μικρές κλίμακες. Μετράμε σχήματα γαλαξιών με εικόνες από την Kilo Degree Survey, έρευνα ειδικά σχεδιασμένη για μετρήσεις βαρυτικών φακών. Λόγω αυτού, οι εικόνες είναι βαθιώς ουρανού, με ελάχιστες επιρροές από τα οπτικά του τηλεσκοπίου και την ατμόσφαιρα της Γης (μετρούμενες μέσω της point-spread function, PSF). Η μέτρηση των σχημάτων γίνεται με τη μέθοδο DEIMOS, που μετράει σχήματα μέσω ολοκληρωμάτων των εικόνων των γαλαξιών και εφαρμόζει διορθώσεις για τη συνάρτηση βαρύτητας στη μέτρηση ολοκληρωμάτων και την PSF.

Με τα δεδομένα αυτά, ξεκινάμε στο **κεφάλαιο 2** μετρώντας σχήματα γαλαξιών σε τρία διαφορετικού μήκους κύματος φίλτρα, g , r και i . Η ευθυγράμμιση των γαλαξιών φαίνεται να είναι πιο ισχυρή όταν οι παρατηρήσεις γίνονται στο g

και i φίλτρο, σε σύγκριση με το r . Η διαφορά αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στους κόκκινους γαλαξίες δορυφόρους, και εμφανίζεται μόνο σε μικρές κλίμακες, μικρότερες από μερικά Mpc/h . Ένας πιθανός φυσικός μηχανισμός που εξηγεί αυτές τις διαφορές είναι η παλιρροιακή φύση του φαινομένου ευθυγράμμισης, μαζί με την χρωματική βαθμίδα των γαλαξιών: οι εξωτερικές περιοχές των γαλαξιών επηρεάζονται περισσότερο από παλιρροιακές δυνάμεις, και το φαινόμενο ευθυγράμμισης προβλέπεται να επηρεάζει περισσότερο τις εξωτερικές από τις εσωτερικές περιοχές των γαλαξιών. Επιπλέον, οι γαλαξίες μεγαλώνουν ιεραρχικά, και οι εσωτερικές περιοχές τους είναι γενικά πιο κόκκινες από τις εξωτερικές, αφού έχουν περισσότερο κόκκινα, παλαιά αστέρια. Έτσι, παρατηρήσεις σε διαφορετικά φίλτρα μπορούν να δίνουν έμφαση σε διαφορετικές περιοχές των γαλαξιών. Η εικόνα αυτή περιπλέκεται αν λάβουμε υπόψη την ερυθρομετάθεση των γαλαξιών και το 4000 Å break, σε σύγκριση με τα φίλτρα παρατήρησης. Ενώ η ακριβής πρόβλεψη του αναμενόμενου σήματος ευθυγράμμισης σε διαφορετικά φίλτρα είναι περίπλοκη, είναι εμφανές ότι ενδιαφέρουσες ανακαλύψεις κρύβονται στην ευθυγράμμιση γαλαξιών σε μικρές κλίμακες.

Συνεχίζουμε την εργασία με το **κεφάλαιο 3**, όπου κοιτάμε την ευθυγράμμιση γαλαξιών στο φίλτρο r , σε μεγάλες κλίμακες. Στόχος είναι να παρέχουμε μια απευθείας μέτρηση του σήματος, για να το χρησιμοποιήσουμε ως α -πρίορι γνώση. Για να το επιτύχουμε, είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιήσουμε δείγμα γαλαξιών όσο το δυνατό πιο αντιπροσωπευτικό μιας έρευνας βαρυτικών φακών. Βρίσκουμε πως οι κόκκινοι γαλαξίες έχουν δυνατό σήμα ευθυγράμμισης ενώ οι μπλε γαλαξίες έχουν σήμα συμβατό με μηδέν, σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες. Χρησιμοποιώντας αυτές τις μετρήσεις ευθυγράμμισης, υπολογίζουμε πως οι σημερινές έρευνες βαρυτικών φακών μπορούν να επιτύχουν σημαντικά πιο ακριβή μετρήσεις της S_8 παραμέτρου.

Στη συνέχεια, εστιάζουμε στην ευθυγράμμιση γαλαξιών σε μικρότερες κλίμακες, κοιτώντας ιδιαίτερα στα γκρουπ γαλαξιών στο **κεφάλαιο 4**. Μετράμε σημαντική αξονική ευθυγράμμιση των γαλαξιακών δορυφόρων σε σχέση με το κέντρο του γαλαξιακού γκρουπ, η οποία μειώνεται στο μηδέν σε μεγάλες αποστάσεις. Επιπλέον, βρίσκουμε πως οι εξωτερικές περιοχές των δορυφόρων (οι οποίες στοχεύονται καθώς αυξάνουμε τη συνάρτηση βαρύτητας κατά τη μέτρηση του σχήματός τους) είναι περισσότερο ευθυγραμμισμένες από τις εσωτερικές περιοχές τους. Κόκκινοι δορυφόροι δείχνουν γενικά πιο ισχυρή ευθυγράμμιση από τους μπλε. Επίσης, οι κεντρικοί γαλαξίες των γκρουπ είναι ευθυγραμμισμένοι με την κατανομή των γαλαξιακών δορυφόρων, με τις εξωτερικές περιοχές των κεντρικών γαλαξιών να είναι πιο ισχυρά ευθυγραμμισμένες από τις εσωτερικές, και τους κόκκινους κεντρικούς γαλαξίες να δείχνουν πιο ισχυρή ευθυγράμμιση από τους μπλε. Οι μετρήσεις αυτές υποδεικνύουν ότι η ευθυγράμμιση γαλαξιών σε μικρές κλίμακες είναι

γενικά περίπλοκο φαινόμενο, και τα ευρήματά μας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουμε υπάρχοντα μοντέλα του σήματος ευθυγράμμισης στις μικρές αυτές κλίμακες.

Στο **κεφάλαιο 5** εμβαθύνουμε περαιτέρω και μελετάμε την ευθυγράμμιση των κεντρικών γαλαξιών με την δική τους άλω σκοτεινής ύλης. Για το σκοπό αυτό, μετράμε το ανισοτροπικό σήμα βαρυτικών φακών γύρω από δείγμα γαλαξιών ειδικά διαλεγμένο με μικρή ποσότητα γαλαξιακών δορυφόρων. Ποσοτικοποιούμε την f_h , μια παράμετρο ευαίσθητη στη σχετική ελλειπτικότητα της άλως σκοτεινής ύλης και του γαλαξία, καθώς επίσης και στην μέση σχετική τους γωνία. Βρίσκουμε πως οι κόκκινοι κεντρικοί γαλαξίες έχουν μη-μηδενική f_h με 2σ στατιστική βεβαιότητα. Η μετρούμενη τιμή της f_h αυξάνεται σημαντικά αν επαναλάβουμε τη μέτρηση χρησιμοποιώντας σχήματα γαλαξιών που είναι πιο ευαίσθητα στις εξωτερικές περιοχές των γαλαξιών. Εφ' όσον η μέση ελλειπτικότητα του σχήματος των γαλαξιών στις εσωτερικές και εξωτερικές περιοχές δεν αλλάζει σημαντικά, συμπεραίνουμε πως οι εξωτερικές περιοχές των γαλαξιών είναι περισσότερο ευθυγραμμισμένες με την άλω σκοτεινής ύλης τους από τις εσωτερικές περιοχές.